



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL**



AMAURY ELOY CARVALHO ARAÚJO SALES

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA A
PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES SUBMETIDOS À
COMPRESSÃO.**

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza
Prof.^a Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho**

Ouro Preto, agosto de 2017.

AMAURY ELOY CARVALHO ARAÚJO SALES

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA A PERFIS
FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES SUBMETIDOS À COMPRESSÃO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Orientador: Flávio Teixeira de Souza

Coorientadora: Arlene Maria Cunha Sarmanho

Ouro Preto

2017

S163a

Sales, Amaury Eloy Carvalho Araújo .

Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão [manuscrito] / Amaury Eloy Carvalho Araújo Sales. - 2017.

83f.: il.: color; grafis; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.

Coorientador: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado Profissional em Construção Metálica.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas. 2. Teoria das estruturas. 3. Flambagem (Mecânica). 4. Confiabilidade (engenharia). I. Souza, Flávio Teixeira de. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA
DIRETA A PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES
SUBMETIDOS À COMPRESSÃO**

AUTOR: AMAURY ELOY CARVALHO ARAÚJO SALES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em seis de outubro de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG (Presidente)



Prof. Arlene Maria Cunha Sarmaão, D. Sc. – UFOP



Prof. Jaime Florencio Martins, D. Sc. – UFOP



Prof. Gabriel Vieira Nunes, M. Sc. – IFMG

A meus pais,

muito obrigado pela dedicação para comigo e para com meus irmãos.

Ao Murilo, meu menino, que neste momento cresce no ventre da mãe.

Venha menino! Estamos te esperando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas oportunidades, saúde e pela família e amigos que tenho.

Aos meus pais, Raimundo e Maria das Graças, e meus irmãos, Aline e Beбето, obrigado pela maravilhosa e fiel companhia. Com vocês, “o voo distante” fica mais fácil.

À minha esposa Luana, pela companhia. E a Murilo, meu filho, que em breve estará entre nós.

À minha Vó Laura e ao meu sogro Marreco, exemplos de resiliência frente às dificuldades.

Agradeço imensamente ao outrora colega de classe e agora, orientador, Flávio Teixeira de Souza, responsável maior por este trabalho, gratidão pela oportunidade, incentivo e dedicação.

À professora Arlene Sarmanho, muito obrigado pelo apoio. Agradeço também ao Gabriel Nunes e a todos do Laboratório de Estruturas.

Aos professores Geraldo Donizete, Henor de Souza e Róvia, pela boa vontade em me atender nesses anos.

À Luciana Paula, amiga e sócia na LAS Consultoria em Engenharia Ltda.

Aos amigos da disciplina Estrutura Metálica (“metaleiros”) da SNC-Lavalin: Eduardo Dantas, Rodolfo Silva, Fernando Carneiro e Jackson Maia; e EPC: Silvana Maron, Carlão, Chico e Vander; obrigado pela convivência e aprendizagem diária.

Ao amigo Fausto Antônio Munoz Muniz, fonte filantrópica de conhecimento técnico em Estruturas Metálicas.

Ao amigo Edézio A. Beleigoli, por me apresentar ao universo das estruturas em aço.

À grande Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, por mais uma oportunidade em minha formação profissional. *Cum Mente Et Malleo.*

À Ouro Preto, minha terra, pródiga em oportunidades de formação àqueles que abriga (Souza, 2013).

“A fé na vitória tem que ser inabalável”

RESUMO

Os perfis de aço formados a frio são amplamente utilizados na construção civil devido à facilidade na conformação das chapas, ao grande número de fornecedores e à variedades das seções transversais ofertadas. As seções rack utilizadas nas colunas dos sistemas de armazenagem industrial possuem perfurações para instalações de vigas e contraventamentos que modificam o comportamento e a resistência da estrutura dificultando o dimensionamento, uma vez que os métodos de dimensionamento previstos na norma brasileira não consideram as perfurações. O objetivo deste trabalho é utilizar um modelo numérico para determinar a força axial de compressão resistente de uma coluna constituída por perfis formados a frio com perfurações e, avaliar a viabilidade da adaptação dos procedimentos normativos para a determinação da força axial de compressão resistente sob o aspecto da flambagem distorcional. O trabalho visa contribuir na adaptação do método da resistência direta, previsto no anexo C da NBR 14762:2010, para perfis com perfurações. Para isto, realizou-se estudo numérico em elementos finitos através do programa ANSYS em colunas sem perfurações submetidas à compressão centrada. Os resultados foram comparados às prescrições normativas segundo o Método da Resistência Direta para validação do modelo. Em seguida, o modelo numérico validado foi utilizado para a avaliação das adaptações do Método da Resistência Direta para colunas com perfurações. Três opções de adaptação foram consideradas, duas propostas de um trabalho anterior e uma proposta neste trabalho. A análise das três situações indicou a viabilidade da adaptação do método da resistência direta para o dimensionamento de perfis com perfurações.

Palavras chave: Estruturas Metálicas, Perfil Formado a Frio, Flambagem Distorcional, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

Cold formed steel structures are widely used in civil construction due to its easy manufacturing, large amount of suppliers and variety of cross sections. The rack sections, used in steel storage racks uprights usually have perforations to fit the beams and bracings connections. These perforations modify the structure behavior and resistance, leading to difficult design procedures because current Brazilian design code doesn't consider the holes effect. This work analyzes, by numerical models, the axial compression resistance of cold formed steel perforated uprights, in order to adapt code procedures to predict distortional buckling influence in these structures, using Direct Strength Method considered in Brazilian code NBR 14762: 2010. A finite element model in commercial software ANSYS of uprights without holes was validated by comparison with Direct Strength Method results. Thus, finite element models results considering the perforations were compared to Direct Strength Method modified hypothesis. Three modifications were tested, two based in a previous work and another developed in this research. These analyses indicated the viability of Direct Strength Method in design of cold formed uprights with perforations subject to distortional buckling.

Key words: Steel Structures, Cold-Formed Steel, Distortional Buckling, Direct Strength Method.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Modos de instabilidade em Perfis Formados a Frio	14
1.1.1	Flambagem Local	15
1.1.2	Flambagem Global.....	15
1.1.3	Flambagem Distorcional.....	16
1.2	Objetivo.....	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Metodologia	19
1.5	Estrutura da Dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.1	Método da Largura Efetiva	21
2.1.2	Método da Seção Efetiva	22
2.1.3	Método da Resistência Direta	22
2.1.4	MRD para seções com perfurações	24
3	MÉTODOS NUMÉRICOS	31
3.1	Introdução	31
3.1.1	Teoria Generalizada de Vigas (GBT)	31
3.1.2	Método dos Elementos Finitos (MEF)	32
3.2	ANÁLISE NUMÉRICA	33
3.2.1	Modelo em Elementos Finitos - ANSYS.....	33

3.2.2	Geometria do Modelo	33
3.2.3	Elemento Utilizado	36
3.2.4	Refinamento da Malha.....	36
3.2.5	Condições de Contorno.....	36
3.2.6	Carregamento.....	37
3.2.7	Propriedades Mecânicas do aço empregado	37
3.2.8	Determinação da força axial de compressão resistente das colunas	39
3.3	Análise pela Teoria Generalizada de Vigas	41
4	RESULTADOS	43
4.1	Análise da coluna sem furos	43
4.2	Análise da coluna com furos.....	45
4.2.1	MOEN 2 – (MOEN; SCHAFER, 2009)	45
4.2.2	MOEN 4 – (MOEN; SCHAFER, 2009)	47
4.3	Proposta de modificação da MOEN 2 (Método alternativo proposto)	49
4.4	Comparação dos resultados.....	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
6	REFERÊNCIAS	56
A.	APDL – SEÇÕES SEM FUROS	61
B.	APDL – SEÇÕES COM FUROS	67
C.	FORÇA AXIAL CRÍTICA DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL ELÁSTICA	73
D.	ESPESSURA FICTÍCIA	74

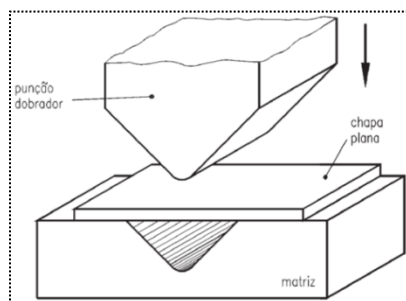
E. RESULTADOS – SEÇÕES SEM FUROS	75
F. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MOEN 2.....	77
G. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MOEN 4.....	79
H. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MÉTODO ALTERNATIVO	81

1 INTRODUÇÃO

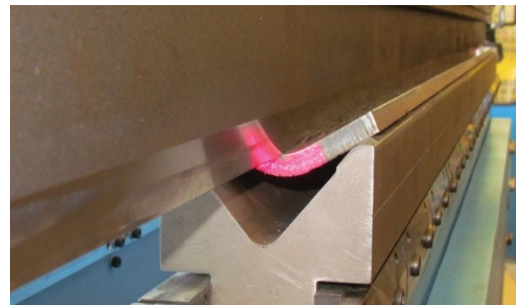
São denominados perfis estruturais de aço formados a frio, os elementos obtidos por dobramento em prensa dobradeira ou por conformação contínua em perfiladeira, a partir de tiras cortadas de chapas ou bobinas de aço carbono ou de baixa liga, sendo as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente. Seu dimensionamento é previsto na NBR 14762:2010 (ABNT, 2010). Desta maneira, são utilizadas chapas de aço com espessuras a partir de 0,4 mm até o limite de 8,0mm (CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014).

O dobramento é feito através de uma prensa dobradeira/viradeira que é formada, basicamente por uma mesa matriz com a forma da dobra pretendida para o perfil e uma punção que pressiona a chapa virgem contra a matriz para efetuar a dobra (Figura 1.1). O dobramento sobre a mesma chapa é repetido diversas vezes até obter-se a conformação desejada para o perfil. O comprimento do perfil é definido pelo comprimento da mesa da dobradeira. Esse processo é mais lento e mais adequado à produção de pequenas quantidades, sendo muito utilizado devido à facilidade de operação.

A conformação contínua é realizada através da passagem longitudinalmente de uma tira de chapa de aço por uma série de roletes ou cilindros de uma perfiladeira que vão impondo gradativamente as dobras na chapa até obter o formato final (Figura 1.2). Ao final da linha de perfilação o perfil pode ser cortado no comprimento de projeto (sob encomenda) ou, num comprimento padronizado. Este processo é mais eficaz devido à produção seriada.

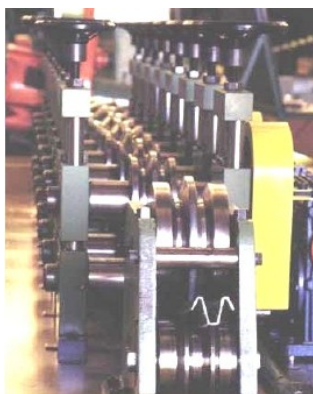


(a)



(b)

Figura 1.1- Prensa dobradeira. (a) Representação esquemática; (b) Dobramento (BAUMANN. Disponível em: <<http://www.baumann.ind.br/cortesedobras/servicos/processo-de-dobra.php>>. Acesso em: fev. 2017.)



(a)



(b)

Figura 1.2- Perfiladeiras. (a) Perfil para guard-rail (SILVA, 2006); (b) Perfil Z (Hangzhou Roll Forming Technology. Disponível em: <<http://hzperfiladeira.com/1-3-4-semi-automatic-purlin-forming-machine>>. Acesso em fev. 2017.).

Da simplicidade de produção dos perfis, obtém-se grande variedade de seções transversais, o que confere ao perfil formado a frio grande versatilidade e produtividade podendo ser aplicado em diversos tipos de construções, tais como:

- Indústria Automobilística: carros, ônibus;
- Indústria Aeronáutica: estrutura de aviões;
- Agroindústria: máquinas e implementos agrícolas;
- Estocagem: Prateleiras, racks, silos, reservatórios;
- Construção Civil: prédios residenciais, comerciais e industriais, mezaninos, telhas para fechamento, formas para concreto.

A Figura 1.3 apresenta algumas seções transversais de perfis formados a frio comumente empregadas no Brasil. Dentre as seções apresentadas os seguintes perfis são padronizados pela norma NBR 6355:2012 (ABNT, 2012): Cantoneira de abas iguais (L), U simples, U enrijecido, Z enrijecido a 90 graus (Z_{90}), Z enrijecido a 45 graus (Z_{45}) e Cartola (Cr).

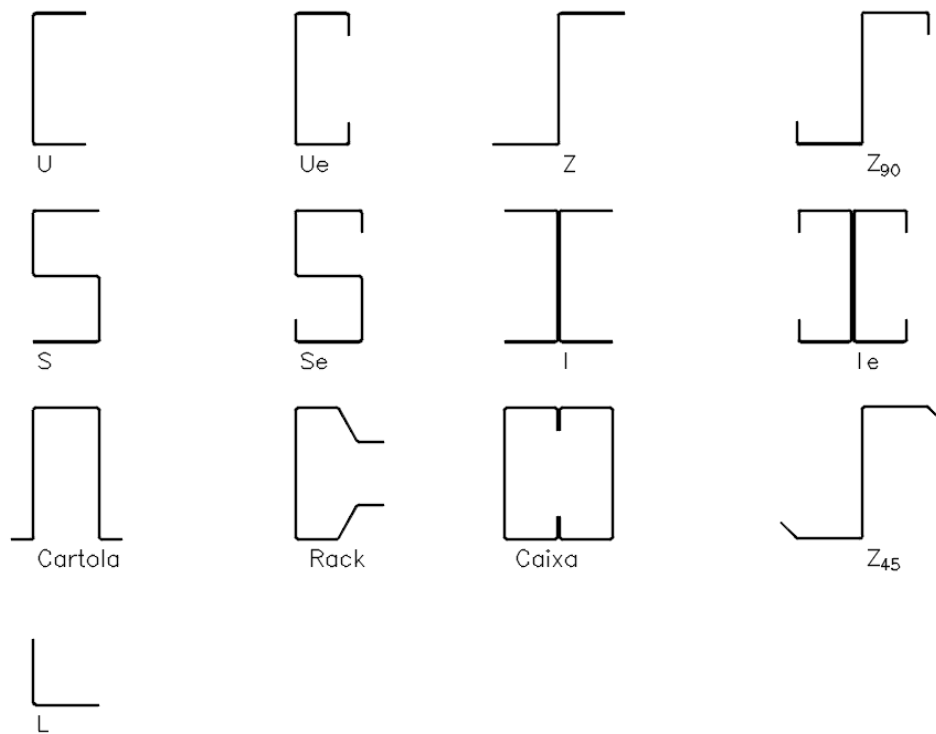


Figura 1.3- Seções transversais usuais de perfis.

Devido ao dobramento a frio, em geral utilizam-se chapas de pequena espessura, o que resultará em perfis mais leves e econômicos que os perfis laminados e soldados. Entretanto, essa característica resulta em problemas de instabilidade característicos, tais como os modos locais e globais de flambagem, além da possibilidade ocorrer a interação entre estes.

1.1 Modos de instabilidade em Perfis Formados a Frio

Os perfis utilizados na Construção Metálica (laminados, soldados e formados a frio), por serem esbeltos estão propícios a problemas de instabilidades de seus elementos devido à compressão. Em particular, os perfis formados a frio são ainda mais susceptíveis a este fenômeno devido à adoção de chapas de pequena espessura. Portanto, é necessária a utilização de critérios de dimensionamento que levem em consideração os diferentes modos de instabilidade a que estão sujeitos estes perfis. Apresentam-se a seguir, os modos de instabilidade de perfis submetidos à compressão.

1.1.1 Flambagem Local

O modo de flambagem local se caracteriza pelo enrugamento ou ondulações de um ou mais elementos do perfil sem que haja deslocamento das arestas da seção transversal do perfil. Este modo apresenta resistência pós flambagem com redistribuição de tensões. A Figura 1.4 apresenta a flambagem local.

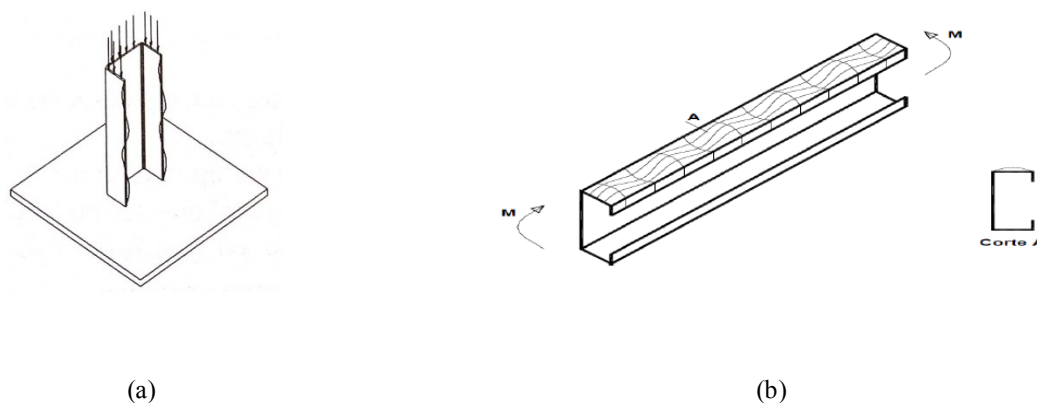


Figura 1.4- Flambagem Local. (a) Devido à compressão (CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014); (b) Devido à flexão (JA VARONI, 1999).

1.1.2 Flambagem Global

A flambagem global ocorre em três formas distintas:

- Flexão;
- Torção;
- Flexo-Torção

Na flambagem por flexão a seção transversal do perfil desloca-se lateralmente. Na flambagem por torção o perfil sofre rotação em torno do seu eixo longitudinal. Finalmente, na flambagem por flexo-torção há uma interação entre os dois modos anteriores. O perfil sofre uma translação juntamente com rotação. A Figura 1.5 apresenta os modos de flambagem global por flexão, torção e flexo-torção.

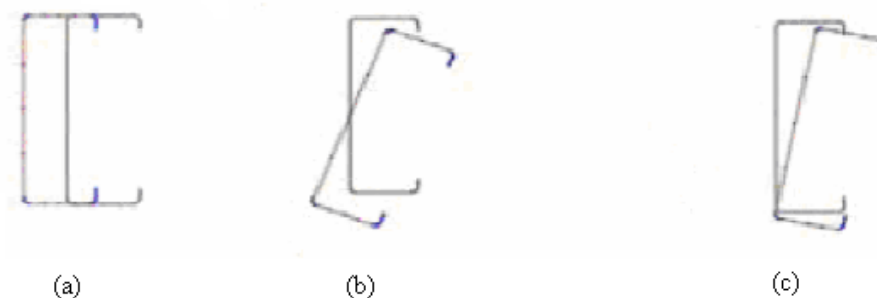


Figura 1.5- Flambagem Global. (a) Flexão. (b) Torção. (c) Flexo-Torção (CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014).

1.1.3 Flambagem Distorcional

Na flambagem distorcional ocorre a translação de pelo menos uma das arestas do perfil, mantendo-se o ângulo entre os elementos comuns da seção transversal. Este fenômeno caracteriza-se pela perda de estabilidade do elemento comprimido, ou seja, abaulamento da alma e conseqüente rotação das mesas do perfil resultando em deslocamentos de suas arestas ocorrendo uma abertura ou fechamento destas (Figura 1.6). Ocorre em perfis abertos com enrijecedores de borda e paredes esbeltas podendo acontecer para carregamentos inferiores ao modo de flambagem local.

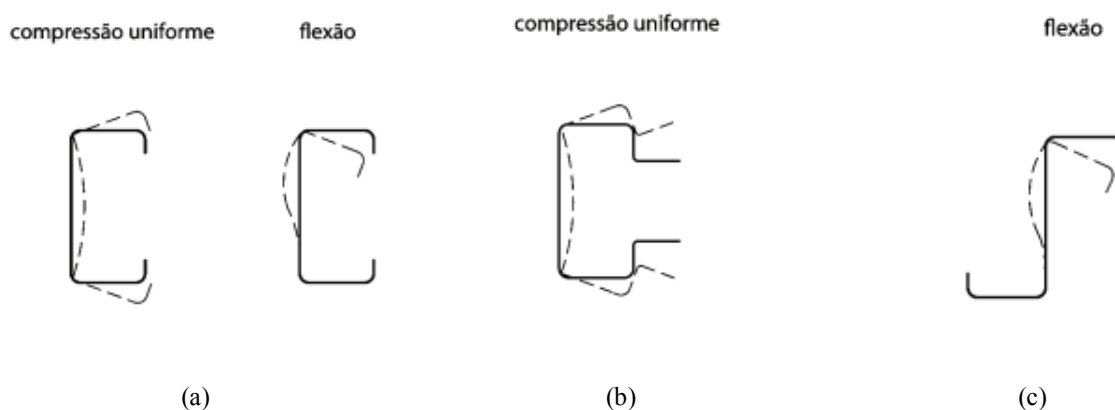


Figura 1.6- Flambagem distorcional (Adaptado de NBR 14672:2010 (ABNT, 2010)). (a) Seção U enrijecido. (b) Seção Rack. (c) Seção Z enrijecido.

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação da aplicação do Método da Resistência Direta na previsão da carga axial resistente à compressão de perfis formados a frio de seção do tipo rack com perfurações.

Seus objetivos específicos são:

- Avaliação da aplicação do método da resistência direta para perfis formados a frio sujeitos ao modo distorcional
- Avaliação da aplicação das propostas de Moen e Schaffer (2009) para arranjos de perfurações diferentes dos utilizados por eles.

1.3 Justificativa

As seções rack, objeto de estudo deste trabalho, são utilizadas nos sistemas de armazenagem industrial, que são empregados por grandes redes atacadistas e varejistas, centros comerciais de distribuição de produtos, indústrias, supermercados, entre outros (Figura 1.7). As colunas dessas estruturas utilizam perfis com essa seção transversal (Figura 1.8), que possuem furos e perfurações para instalações de vigas e contraventamentos. Estas perfurações modificam o comportamento e a resistência da estrutura dificultando o dimensionamento, uma vez que os métodos de dimensionamento previstos na norma brasileira de dimensionamento não as consideram. Esta condição motivou diversas pesquisas para avaliação do comportamento estrutural como apresentados em Vazquez (1998), Oliveira (2000), Freitas, Freitas e Souza (2005, 2010), Freitas et al (2013) e Faria et al (2015).

O Método da Resistência Direta, previsto na NBR 14762 e descrito no Capítulo 2 deste trabalho, surge como uma possibilidade, pois estudos anteriores indicam a possibilidade de sua utilização em estruturas com perfurações (MOEN; SCHAFFER, 2009; SOUZA, 2013; FREITAS et al, 2013; FARIA et al, 2015; FARIA, 2016).

Este trabalho visa contribuir na adaptação do método da resistência direta para perfis com perfurações.



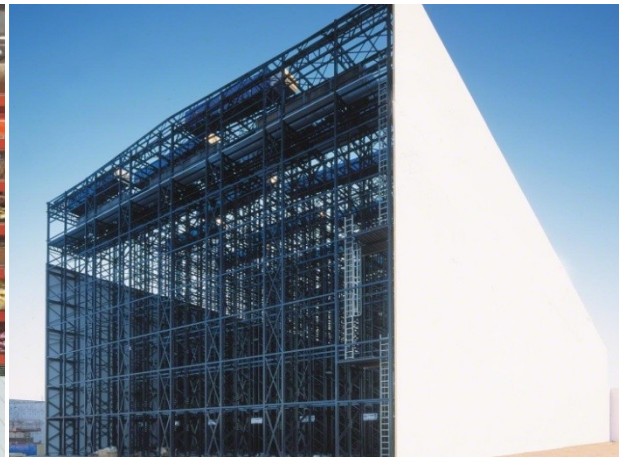
(a)



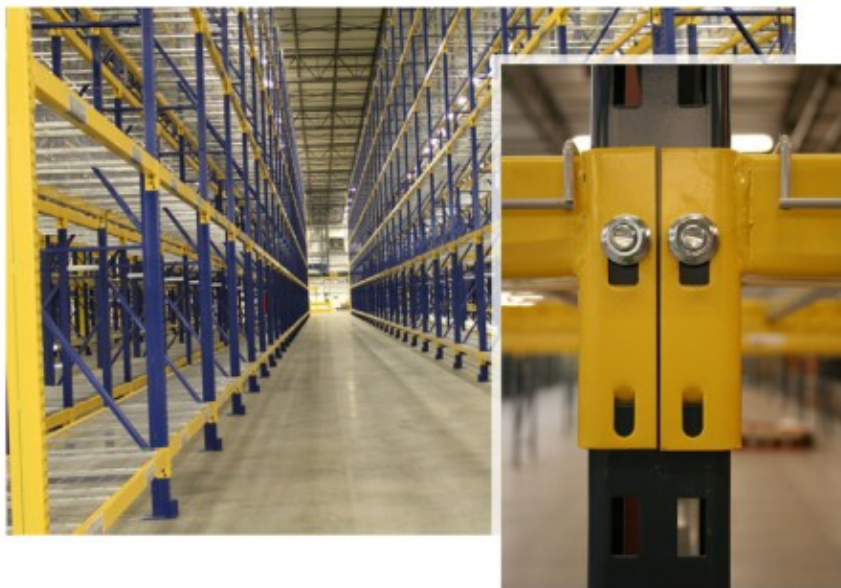
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 1.7- Sistema de armazenagem industrial – (a) Sistema porta paletes (Á GUIA, 2013); (b) Sistema *drive-in* Mecalux(MECALUX, 2016); (c) Sistema mini porta paletes (Á GUIA, 2013); (d) Sistema auto portante (MECALUX, 2016); (e) Sistema porta paletes (CAI; MOEN, 2016);

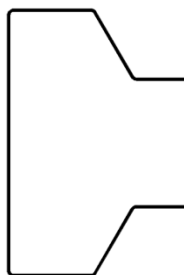


Figura 1.8- Perfil *Rack*.

1.4 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho é a seguinte:

- Comparar a força axial de compressão resistente de uma coluna constituída por perfis formados a frio sem perfurações, obtida por um modelo numérico em

elementos finitos com resultados obtidos a partir de prescrições normativas da NBR14762;

- Utilizar o modelo em elementos finitos desenvolvido para a determinação da força axial de compressão resistente de uma coluna constituída por perfis formados a frio com perfurações;
- Avaliar, com base nos resultados obtidos por meio da comparação com resultados via elementos finitos, a viabilidade da adaptação dos procedimentos normativos para a determinação da força axial de compressão resistente de perfis formados a frio com perfurações.

1.5 Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 serão apresentados os métodos de dimensionamento de perfis formados a frio com destaque para o Método da Resistência Direta (MRD) conforme proposto no anexo C da NBR 14762:2010. Também são apresentados os estudos sobre a para utilização do MRD na previsão da força resistente de seções com perfurações (MOEN; SCHAFFER, 2009).

No capítulo 3 descrevem-se os métodos numéricos empregados neste trabalho, bem como os procedimentos realizados para a construção dos modelos das colunas.

No capítulo 4 são abordados os resultados da análise das colunas sem furos a partir das prescrições da NBR 14762 e das colunas com furos segundo as expressões propostas por Moen e Schaffer (2009). Apresenta-se também neste capítulo uma proposta de um procedimento para a obtenção da força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional da seção com furos.

No capítulo 5 têm-se as considerações finais do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Descrevem-se a seguir os métodos de dimensionamento dos perfis formados a frio conforme preconizado pela NBR 14762:2010 com abordagem para a determinação da força resistente à compressão axial devido ao modo de flambagem distorcional que é o objeto deste estudo. Descrevem-se também os estudos de Moen e Schaffer (2009), sobre a determinação da força resistente à compressão axial de perfis formados a frio com furos.

2.1.1 Método da Largura Efetiva

O Método da Largura Efetiva foi desenvolvido para analisar o comportamento pós flambagem local de chapas comprimidas e foi inicialmente proposto por Von Kármán considerando a flambagem em chapas ideais, sem imperfeições. Posteriormente, George Winter calibrou para chapas reais a expressão teórica de Von Kármán (apud CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014) conforme apresentado na Figura 2.1.

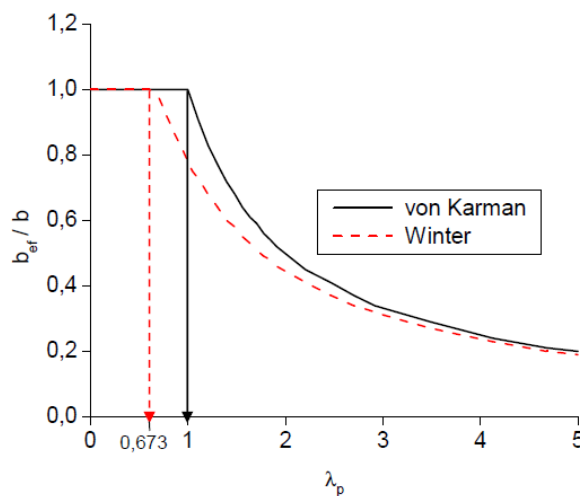


Figura 2.1- Curvas propostas por Von Kármán e Winter.(apud MAIA, 2012).

O método considera cada chapa que forma a seção transversal do perfil como uma placa isolada que deve ter sua largura reduzida quando submetida total ou parcialmente a tensões de compressão. As novas propriedades geométricas da seção transversal efetiva, que serão usadas no dimensionamento, devem ser calculadas baseadas nesta redução dimensional fictícia. Considera-se ainda a resistência pós-flambagem das chapas tornando a carga última de colapso maior que a carga crítica de flambagem local.

A distribuição de tensões em perfis que apresentam flambagem por distorção é diferente daqueles que apresentam flambagem local. Assim, o conceito de largura efetiva não se aplica à verificação de resistência quanto à flambagem distorcional (SILVA; PIERIN; SILVA, 2014).

2.1.2 Método da Seção Efetiva

O Método da Seção Efetiva é uma parametrização do Método da Resistência Direta (CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014), visando facilitar a utilização das normas em procedimentos de dimensionamento.

Apresenta menor volume de cálculos em relação ao Método das Larguras Efetivas. No entanto, possui a mesma limitação deste, não sendo adequado ao dimensionamento de seções sujeitas à flambagem distorcional.

2.1.3 Método da Resistência Direta

O Método Resistência Direta (SCHAFFER, 2002) foi desenvolvido para contornar as dificuldades e limitações existentes nos métodos da Largura Efetiva e baseia-se em curvas empíricas calibradas para determinar a força resistente do perfil através da carga crítica de flambagem elástica associadas aos modos de flambagem local e distorcional (CARVALHO; GRICOLETTI; BARBOSA, 2014). Para a obtenção dessas cargas críticas, podem-se utilizar diferentes métodos numéricos tais como o Método das Faixas Finitas, Métodos dos Elementos Finitos, ou a Teoria Generalizada de Vigas.

O Método da Resistência Direta (MRD) trata do dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada ou flexão simples e está proposto no anexo C da norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio (NBR 14672:2010, 2010).

Este trabalho trata da análise da resistência de perfis tipo rack submetidos à compressão centrada sujeitos à flambagem distorcional segundo o Método da Resistência Direta. As prescrições normativas segundo a NBR 14672:2010 para este fenômeno são apresentadas na Equação 1. Ressalta-se que estas expressões são válidas apenas para perfis sem perfurações.

$$N_{c,Rd} = N_{c,Rdist} / 1,2$$

$$N_{c,Rdist} = A \times f_y, \text{ para } \lambda_{dist} \leq 0,561$$

$$N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \times \frac{A \times f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}, \text{ para } \lambda_{dist} > 0,561$$

Equação 1

Onde,

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{A \times f_y}{N_{dist}}\right)^{0,5};$$

A → Área bruta da seção transversal da barra;

f_y → Tensão de escoamento do material;

N_{dist} → Força axial de flambagem distorcional elástica (carga crítica). Devem ser calculadas por meio de análise de estabilidade elástica por meio de programa computacional para este fim. Neste trabalho foram obtidas através do GBTUL (BEBIANO; CAMOTIN; SILVESTRE, 2008);

$N_{c,Rdist}$ → Resistência característica de compressão, associado à flambagem distorcional;

$N_{c,Rd}$ → Resistência de cálculo à compressão, associado à flambagem distorcional;

λ_{dist} → Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.

2.1.4 MRD para seções com perfurações

O objetivo das pesquisas de Moen e Schaffer (2009) foi desenvolver um método de dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações através de modificações nas equações do Método da Resistência Direta. Seu trabalho é abrangente, considerando estruturas sujeitas à compressão e à flexão, e analisando os três modos de flambagem, local, distorcional e global. Este trabalho se ateve a barras comprimidas sujeitas à flambagem distorcional.

Moen e Schaffer (2009) fizeram uma análise teórico-experimental de vigas e colunas de perfis U enrijecido com furos na alma para avaliar sua influência na carga crítica, na resistência e no comportamento de perfis sujeitos aos modos local, distorcional e global. Para as colunas, foram feitos ensaios de compressão em 24 corpos de prova com e sem furos na alma e, análise de autovalor (flambagem elástica - eigenbuckling) através do software ABAQUS (ABAQUS, 2007) para identificação e comparação dos primeiros modos das flambagens local e distorcional desses protótipos. Além disso, procedeu-se a análise numérica de um banco de dados de corpos de provas em perfis formados a frio com furos que foram ensaiados à compressão no período de 1981 a 2008.

Para determinar a força axial resistente à compressão por meio do Método da Resistência Direta em perfis formados a frio com furos, métodos aproximados foram desenvolvidos para calcular a carga de flambagem elástica por meio da análise de estabilidade da seção pelo método das faixas finitas.

A aproximação proposta considera a perda de rigidez, devido à presença do furo, de uma seção transversal sujeita à flambagem distorcional através da modificação da espessura original da alma da seção por uma espessura fictícia, reduzida, conforme a Equação 2.

$$t_{web,hole} = \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}}\right)^{1/3} \times t_w$$

Equação 2

Onde,

$t_{web,hole}$ → Espessura fictícia da alma;

$L_h \rightarrow$ Comprimento do furo;

$L_{crd} \rightarrow$ Comprimento da meia onda do modo distorcional.

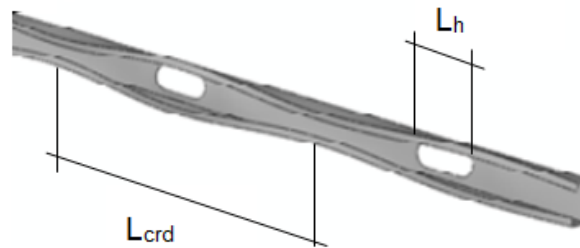


Figura 2.2 - Dimensões L_{crd} e L_h . (Adaptado de MOEN; SCHAFFER, 2009).

Desse modo, a carga crítica distorcional à compressão está associada à área líquida da seção transversal da barra (A_{net}) onde a alma da seção tem a espessura t_w , substituída por $t_{web,hole}$ conforme apresentado na Figura 2.3. Esta seção fictícia deve ser considerada para a determinação da carga axial crítica de flambagem distorcional por meio de análise de estabilidade elástica. Moen utilizou nesta análise o software CUFSM (SCHAFFER, 2006) enquanto neste trabalho utilizou-se o software GBTUL (BEBIANO; CAMOTIN; SILVESTRE, 2008).

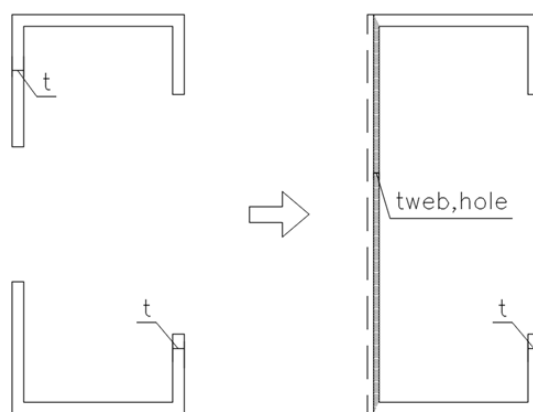


Figura 2.3- Espessura fictícia da alma, $t_{web,hole}$.

Moen e Schaffer fizeram análise numérica, via ABAQUS (2007), de 211 colunas em perfil U enrijecido - conforme seções padronizadas pela Steel Stud Manufactures Association SSMA (2016) - contendo furos na alma, em formato oblongo ou circular. Os comprimentos e a seções

transversais adotadas para as colunas foram àquelas predispostas a ocorrerem falhas devido à flambagem local, flambagem distorcional e flambagem global. Para os estudos específicos de flambagem distorcional, fixou-se o comprimento das colunas em 609,6 mm (24 polegadas) e a largura da alma foi variada de 152,4 mm (6 polegadas) a 304,8 mm (12 polegadas). O espaçamento entre furos utilizado foi 304,8 mm (12 polegadas). Foram utilizados furos circulares centralizados na alma e seu diâmetro foi definido buscando razões entre a área líquida da seção transversal e a área bruta (A_{net} / A_g) igual a 1,0 (sem furos), 0,9; 0,8; 0,7 e 0,6 (Figura 2.4). Foram adotadas espessuras para as chapas de aço de até 2,58 mm.

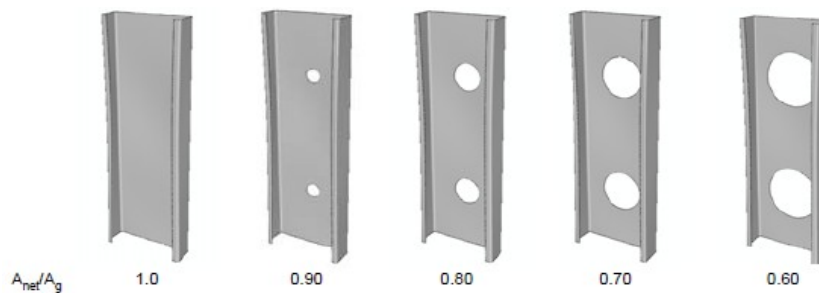


Figura 2.4- Relação entre área líquida e área bruta (MOEN E SCHAFFER, 2009).

A partir deste estudo, Moen e Schaffer propuseram modificações na curva original do Método da Resistência Direta para determinar a força axial resistente de compressão para colunas com furos.

Foram propostas seis opções de modificação nas expressões originais do MRD para a previsão da força resistente à compressão de seção com furos segundo as flambagens global, local e distorcional. Dentre estas, este trabalho considera duas, mais representativas para a flambagem distorcional, apresentadas nas Equações 3 e 4, aqui denominadas MOEN 2 e MOEN 4, com base na nomenclatura original. As opções são numeradas conforme o trabalho original (2 e 4) e a denominação dos termos segue texto original. Por vezes, tal denominação é diferente ou não existe na norma brasileira. Quando possível, os termos serão remetidos aos seus correspondentes da NBR 14762:2010.

2.1.4.1 MOEN 2 – (MOEN; SCHAFFER, 2009)

Para $\lambda_{dnet} \leq 0,561$:

$$P_{nd} = P_{ynet} ;$$

Equação 3

Para $\lambda_{dnet} > 0,561$:

$$P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} \times P_{ynet}$$

Onde,

$$\lambda_{dnet} = \left(\frac{P_{ynet}}{P_{crd}} \right)^{0,5} ;$$

$$P_{ynet} = A_{net} \times F_y ;$$

A_{net} → Área líquida da seção transversal da barra;

F_y → Tensão de escoamento do material;

P_{crd} → Força axial crítica de flambagem distorcional elástica para seção com furos. Devem ser calculadas por meio de análise de estabilidade elástica. Neste trabalho foram obtidas através do GBTUL onde a espessura da alma da seção (t_w) foi substituída pela espessura fictícia ($t_{web,hole}$) conforme Equação 2 e apresentado na Figura 2.5 . P_{crd} equivalente a N_{dist} na NBR 14762:2010;

P_{nd} → Resistência característica à compressão da seção com furos, associado à flambagem distorcional. Equivalente a $N_{e,Rdist}$ na NBR 14762:2010;

λ_{dnet} → Índice de esbelteza reduzido da seção com furos associado à flambagem distorcional.

Material Properties

#Material	E _{xx}	E _{zz}	ν _{xy}	ν _{xz}	G _{xy}	ρ
1	200000	200000	0.3	0.3	76923	7.89E-05

Isotropic Material

Natural Nodes

#Node	Y	Z
1	67	50.019
2	47	50.019
3	32	76
4	0	76
5	0	0
6	32	0

Walls and Intermediate Nodes

#Wall	#Node1	#Node2	#Material	IntermediateNodes	Thickness
1	1	2	1	4	0.9
2	2	3	1	3	0.9
3	3	4	1	2	0.9
4	4	5	1	1	0.85
5	5	6	1	2	0.9
6	6	7	1	3	0.9

Length-Distributed Elastic Supports and Additional Masses
Distributed along longitudinal edges

#Node	K _y	K _z	K _o	M
*				

Cross-Section Geometry

Plot Options

- Natural Nodes
- Walls
- Materials
- Intermediate Nodes
- Wall Segments
- Y-Z Coordinate System

Update Plot

Figura 2.5- Entrada de dados no GBTUL. Substituição de t_w por $t_{w,hole}$.

2.1.4.2 MOEN 4 – (MOEN; SCHAFFER, 2009)

Para $\lambda_d \leq \lambda_{d1}$:

$$P_{nd} = P_{ynet};$$

Para $\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$:

$$P_{nd} = P_{ynet} - \left(\frac{P_{ynet} - P_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) \times \lambda_d;$$

Equação 4

Para

$$\lambda_d > \lambda_{d2}:$$

$$P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \times P_y$$

Onde,

$$\lambda_d = \left(\frac{P_y}{P_{crd}} \right)^{0,5};$$

$$P_y = A_g \times F_y;$$

$$\lambda_{d1} = 0,561 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right);$$

$$\lambda_{d2} = 0,561 \left(14 \left(\frac{P_{ynet}}{P_y} \right)^{-0,4} - 13 \right);$$

$$P_{d2} = \left(1 - \left(1 - 0,5 \lambda_{d2}^{-1,2} \right)^2 \right) P_y;$$

$$P_{ynet} = A_{net} \times F_y \geq 0,6 P_y;$$

A_g → Área bruta da seção transversal da barra;

A_{net} → Área líquida da seção transversal da barra;

F_y → Tensão de escoamento do material;

P_{crd} → Força axial crítica de flambagem distorcional elástica para seção com furos. Devem ser calculadas por meio de análise de estabilidade elástica. Neste trabalho foram obtidas através do GBTUL onde a espessura da alma da seção (t_w) foi substituída pela espessura fictícia ($t_{web,hole}$) conforme mostrado na Equação 2. P_{crd} equivalente a N_{dist} na NBR 14762:2010;

P_{nd} → Resistência característica à compressão da seção com furos, associado à flambagem distorcional. Equivalente a $N_{c,Rdist}$ na NBR 14762:2010;

λ_d → Índice de esbeltez reduzido da seção com furos associado à flambagem distorcional.

Neste trabalho, será desenvolvido um procedimento semelhante, a partir do uso de ferramentas numéricas. No capítulo 3 apresentam-se considerações sobre os métodos numéricos e a análise numérica desenvolvida para obtenção das forças axiais críticas de flambagem e da força axial resistente de compressão para perfis formados a frio com seção e arranjo de perfurações diferentes dos considerados por Moen e Schaffer.

3 MÉTODOS NUMÉRICOS

3.1 Introdução

Diversos problemas da engenharia são descritos em equações com derivadas parciais, cuja resolução analítica pode inviabilizar a análise. O desenvolvimento de computadores e dos métodos numéricos possibilitam de forma mais simples a análise do comportamento e da resistência de elementos estruturais. Neste trabalho, os métodos numéricos utilizados foram a Teoria Generalizada de Vigas (GBT – *Generalised Beam Theory*), através do software GBTUL (BEBIANO; CAMOTIN; SILVESTRE, 2008) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) através do software ANSYS (2012).

3.1.1 Teoria Generalizada de Vigas (GBT)

A Teoria Generalizada de Vigas (*Verallgemeinerte Technische Biegetheorie*, no original em alemão) foi desenvolvida em 1966 por Richard Schardt, professor da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha), para analisar o comportamento de elementos estruturais prismáticos com seções transversais de paredes finas (DÔRES.2014). O interesse por este método ampliou-se a partir de sua publicação em meados dos anos noventa (SCHARDT, 1994a, 1994b).

A GBT se baseia na análise dos modos de flambagem possíveis na viga de forma separada e a composição entre eles, de modo a obter o comportamento real da coluna, além de possibilitar uma separação de modos, ou seja, a avaliação da influência de cada modo no comportamento da coluna (SOUZA, 2013). Este método possui melhor eficiência computacional e maior possibilidade de análise dos modos de instabilidade se comparado ao método dos elementos finitos. No entanto, ainda possui limitações, tais como a impossibilidade da consideração de placas com perfurações, apesar de pesquisas recentes (CAI; MOEN, 2016) abordarem formulações para este fim.

Neste trabalho, a GBT foi utilizada para a avaliação da determinação da força axial crítica associada à flambagem distorcional das seções em estudo para posterior utilização no cálculo da força axial de compressão resistente por meio do método dos elementos finitos.

3.1.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta numérica que consiste na discretização da estrutura em uma malha de elementos e nós que transformam o domínio de contínuo para discreto. Através de funções de interpolação convenientes, este sistema discreto simula o comportamento do sistema contínuo original. A vantagem do método dos elementos finitos é a amplitude de possibilidades de utilização, uma vez que os elementos finitos se adaptam a uma ampla diversidade de geometrias.

As primeiras aplicações do método em engenharia datam do final da década de 1960 (TUNER et al, 1956) com a intenção de estender o método de análise matricial de estruturas para os problemas de contínuo elástico (CASTELANI, 2012) . Em 1960 o professor Ray W. Clough da Universidade da Califórnia - Berkeley (EUA) deu nome ao método e formou o primeiro grupo de pesquisas para aplicação do método em engenharia civil. Desde então o método tem sido aprimorado em busca de maior exatidão e eficiência computacional e tornado-se popular em áreas como magnetismo, mecânica dos fluidos, mecânica dos sólidos e transferência de calor.

Sua aplicação neste trabalho foi na determinação da força axial de compressão resistente dos protótipos, a fim de comparações com os resultados obtidos pelo Método da Resistência Direta.

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Este capítulo descreve a utilização de modelagem computacional através de métodos numéricos para análise do comportamento de perfis tipo rack sem e com perfurações submetidas à compressão centrada.

Foram analisadas colunas sem perfurações através da Teoria Generalizada de Vigas, via GBTUL (BEBIANO; CAMOTIN; SILVESTRE, 2008), para se determinar a carga crítica de compressão centrada associada ao modo de flambagem distorcional e o comprimento da coluna correspondente a este modo.

Além disto, foi utilizado o Método dos Elementos Finitos, através do software ANSYS (2012), para a avaliação da capacidade resistente das colunas com e sem perfurações, a fim de se efetuarem comparações com os resultados obtidos a partir da análise de estabilidade via GBTUL combinada com prescrições normativas do Método da Resistência Direta.

Foi desenvolvido um total de 100 modelos: 25 modelos sem perfurações, 25 modelos com perfurações, variando-se ainda a tensão de escoamento (f_y) e tensão última (f_u) do aço.

3.2.1 Modelo em Elementos Finitos - ANSYS

O modelo numérico desenvolvido no ANSYS para as colunas tem o objetivo de prever a força axial de compressão resistente das colunas, e seus resultados são comparados com os resultados teóricos. A análise das colunas sem perfurações tem o objetivo de comprovar a validação do procedimento numérico desenvolvido por Souza (2013). Numa segunda fase, o modelo validado é utilizado para determinar a força axial de compressão resistente das colunas sem perfurações.

3.2.2 Geometria do Modelo

A Figura 3.1 apresenta a identificação dos elementos (faces) da seção tipo rack, objeto desse estudo, e também o arranjo e as dimensões das perfurações existentes na alma das colunas. A Tabela 3.1 apresenta as dimensões das 50 seções analisadas neste trabalho onde os comprimentos dos modelos sem furos foram determinados pela análise via GBTUL, sendo adotado o comprimento em que ocorre a carga crítica de flambagem distorcional da seção. O

comprimento dos modelos com furos apresentam uma pequena modificação em relação ao modelo sem furos para permitir a inserção dos furos.

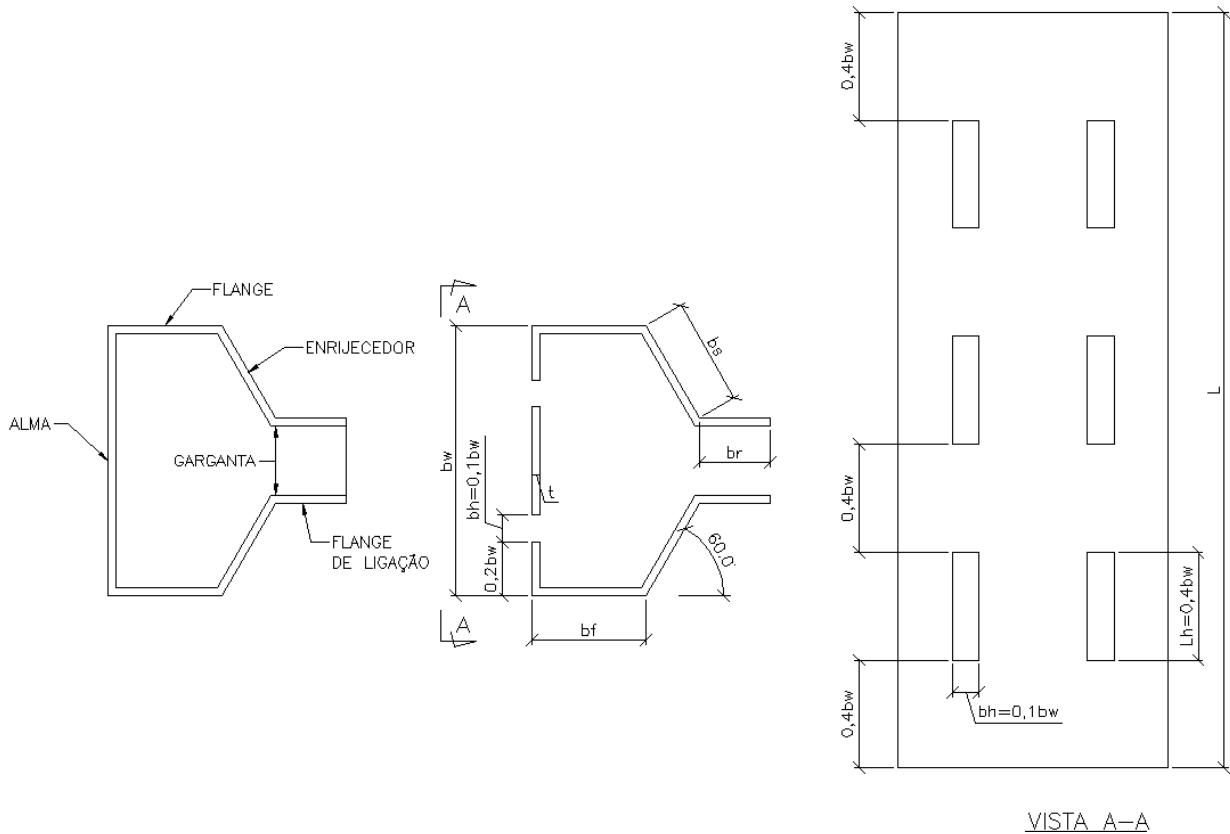


Figura 3.1- Seção analisada, identificação das faces e furos.

As dimensões das seções analisadas variam entre si pela largura da alma (b_w) e pela espessura da chapa (t). As seções obedeceram a seguinte nomenclatura:

AA-BB x CC

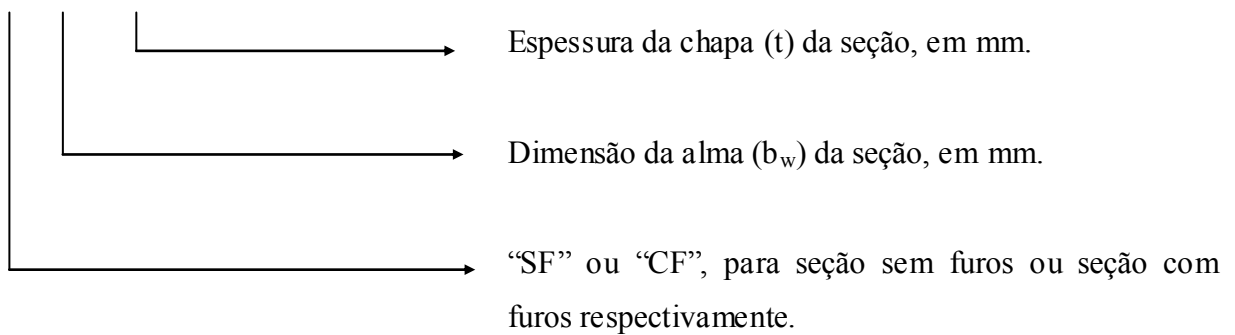


Tabela 3.1- Seções Analisadas e comprimento (L) dos modelos sem furos e com furos

Seção	Seção					Comprimento do modelo-SF- (mm)	Comprimento do modelo-CF- (mm)
	b _w	b _f	b _s	b _r	t		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
76x0,9	76	32	30	20	0,90	700	729,6
76x1,2					1,20	600	608,0
76x1,8					1,80	500	486,4
76x2					2,00	450	425,6
76x2,25					2,25	450	425,6
80x0,9	80	32	30	20	0,90	700	704,0
80x1,2					1,20	400	384,0
80x1,8					1,80	500	512,0
80x2					2,00	450	448,0
80x2,25					2,25	450	448,0
94x0,9	94	32	30	20	0,90	700	676,8
94x1,2					1,20	600	601,6
94x1,8					1,80	500	526,4
94x2					2,00	500	526,4
94x2,25					2,25	450	451,2
100x0,9	100	32	30	20	0,90	700	720,0
100x1,2					1,20	600	640,0
100x1,8					1,80	500	480,0
100x2					2,00	500	480,0
100x2,25					2,25	450	480,0
120x0,9	120	32	30	20	0,90	750	768,0
120x1,2					1,20	650	672,0
120x1,8					1,80	550	576,0
120x2					2,00	500	480,0
120x2,25					2,25	450	480,0

A Figura 3.2 apresenta a geometria gerada para colunas sem e com perfurações juntamente com as placas de extremidades. Os centros de gravidade das placas coincidem com o centro de gravidade da seção transversal das colunas.

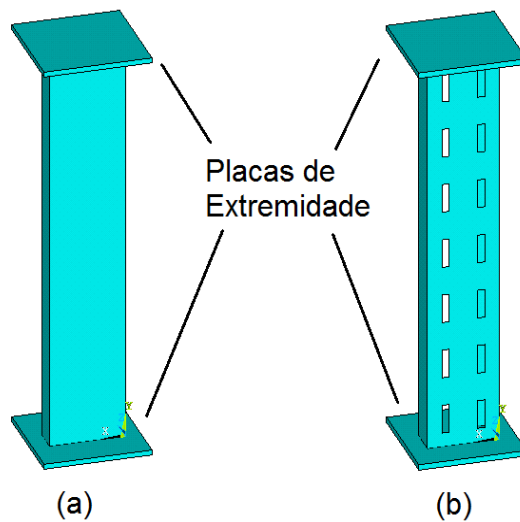


Figura 3.2 - Protótipos. (a) Sem furos; (b) Com furos.

3.2.3 Elemento Utilizado

O elemento de casca disponível na biblioteca do ANSYS utilizado para a geração das malhas foi o elemento *Shell 181*. O elemento *Shell 181* é indicado para análises plásticas e apresenta quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translações nas direções X, Y e Z, e rotações em torno dos eixos X, Y e Z. Sua escolha foi baseada nos bons resultados obtidos em trabalhos anteriores (SOUZA, 2013; SILVA, 2011).

Para as placas de extremidades (placa de reação), foi utilizado o elemento *Solid45* que apresenta oito nós com três graus de liberdade em cada nó, translação nas direções X, Y e Z. Este elemento obteve comportamento satisfatório nos estudos de Faria (2016).

3.2.4 Refinamento da Malha

O refinamento da malha é um aspecto importante do modelo, pois deve proporcionar precisão nos resultados aliado ao menor tempo de análise computacional. Baseado nos estudos de Souza (2013) e Faria (2016) utilizaram-se elementos quadrados com dimensão de 10% da largura da alma do perfil.

3.2.5 Condições de Contorno

As condições de contorno adotadas foram:

- Considerou-se como condição de apoio as extremidades simplesmente apoiada. Estas condições de apoio são obtidas com a aplicação de restrições translacionais nas duas direções ortogonais ao eixo da coluna nas extremidades;
- Acoplaram-se todos os graus de liberdade dos nós extremos coincidentes entre a extremidade do perfil e das placas, para simular o efeito da solda entre eles;
- Para evitar o deslocamento de corpo rígido, a translação na direção axial da coluna (eixo Y) foi impedida em um nó à meia altura do modelo localizado na alma da coluna, conforme representado na Figura 3.3.

3.2.6 Carregamento

O carregamento foi aplicado uniformemente distribuído em todos os nós das placas de extremidades para garantir a centralização das cargas. A Figura 3.3 apresenta um modelo com e sem furos, com malha e com todas as condições de contornos e cargas aplicadas.

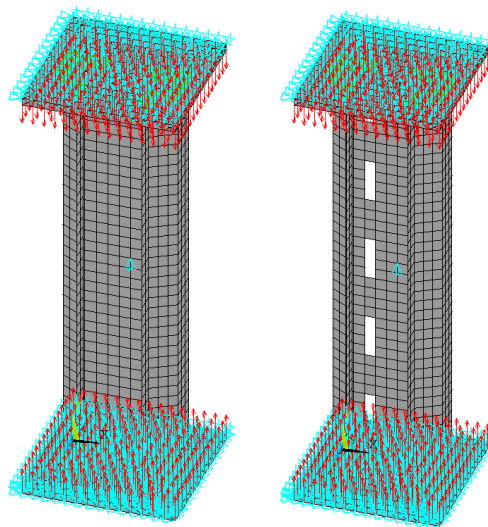


Figura 3.3- Todas as condições de contorno aplicadas

3.2.7 Propriedades Mecânicas do aço empregado

Considerou-se o Módulo de Elasticidade (E) do aço igual a 200000 MPa.

Foram utilizados dois aços com as seguintes Tensões de Escoamento e Tensões Últimas:

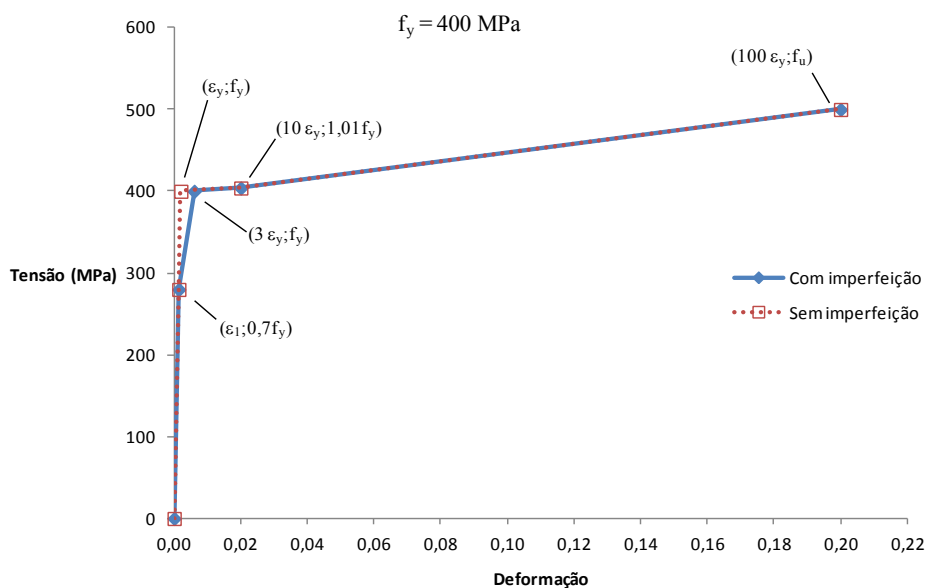
- $f_y = 400$ MPa e $f_u = 500$ MPa;

- $f_y = 220$ MPa e $f_u = 328$ MPa.

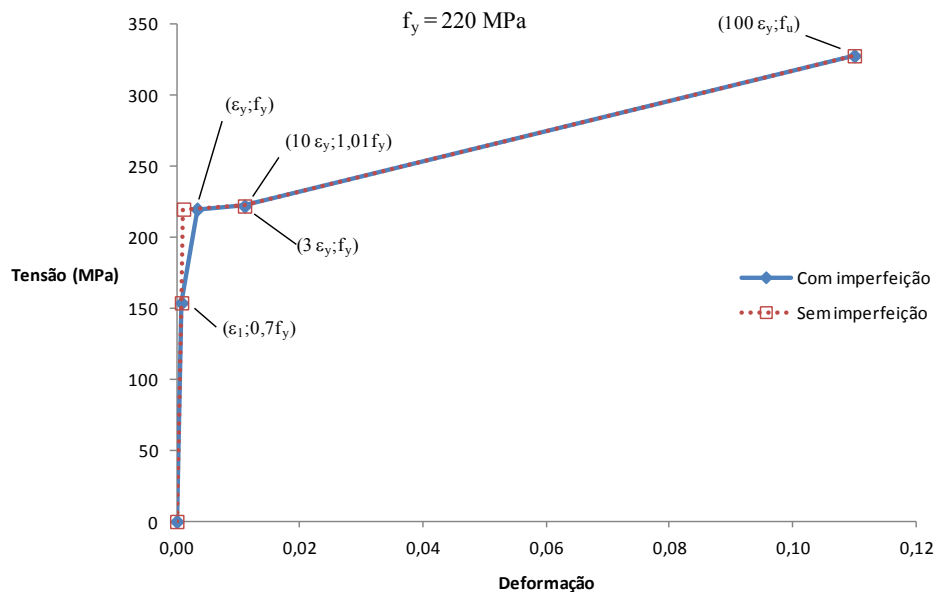
Com base nos estudos de Faria (2016), as propriedades elasto-plásticas do aço foram introduzidas através da aproximação do diagrama Tensão x Deformação real por um diagrama multilinear, apresentado na Figura 3.4.

Adotou-se no diagrama a imperfeição limite para o trecho linear elástico igual a $0,7 f_y$ em função das tensões residuais do aço conforme NBR 6892:2002 (ABNT, 2002). Para as deformações dos trechos baseou-se no trabalho de Almeida (2012) com os seguintes parâmetros:

- Valores das tensões de escoamento e últimas citados;
- Deformação correspondente à imperfeição $0,7 f_y$ é definida como ε_1 ;
- Deformação limite para as tensões residuais igual a $3\varepsilon_y$;
- A deformação $10\varepsilon_y$ define o fim do patamar de escoamento;
- A tensão última (f_u) corresponde a $100\varepsilon_y$.



(a)



(b)

Figura 3.4 - Diagrama Tensão x Deformação. (a) $f_y = 400$ MPa; (b) $f_y = 220$ MPa.

3.2.8 Determinação da força axial de compressão resistente das colunas

Inicialmente foi feita a análise de flambagem linear das colunas submetidos à compressão centrada para obter o modo distorcional de instabilidade. Em seguida, imperfeições iniciais foram introduzidas a partir da deformada associada a este modo. O fator de imperfeição foi adotado igual à espessura da chapa (SOUZA, 2013; FARIA 2016). Foram considerados os efeitos de segunda ordem e da plasticidade do aço.

Na solução não linear foi aplicada uma carga axial de compressão, uniformemente distribuída, nos nós da extremidade da placa com valor superior ao esperado para a carga de escoamento da seção. Esta carga foi aplicada em 50 subetapas utilizando-se o Método do Comprimento de Arco como estratégia de incremento de carga com critério de parada para um deslocamento máximo no modelo igual a oito milímetros, limite observado experimentalmente por Souza (2013). Foram assim obtidas as forças axiais de compressão resistente dos protótipos

apresentados na Tabela 3.1. O processo foi automatizado, por meio de uma rotina de programação em linguagem própria do ANSYS (APDL), apresentada no Apêndice A.

A Figura 3.5 apresenta um exemplo dos deslocamentos nos modelos sem e com furos. Observam-se em ambas as situações a ocorrência da flambagem distorcional. A Figura 3.6 apresenta um exemplo de curvas carga x deslocamento nos protótipos sem e com furos, destacando-se a força axial à compressão resistente dos protótipos.

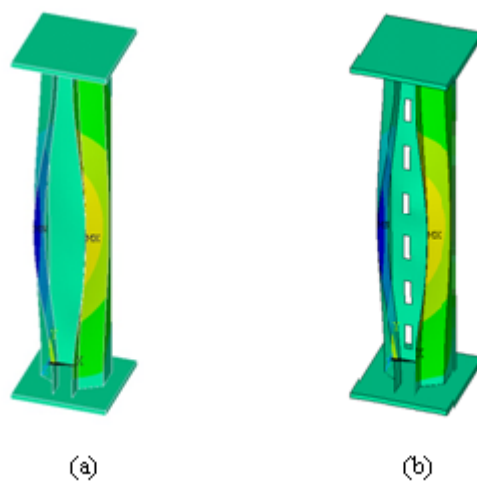


Figura 3.5- Flambagem Distorcional: (a) Seção SF-76x2; (b) Seção CF-76X2.

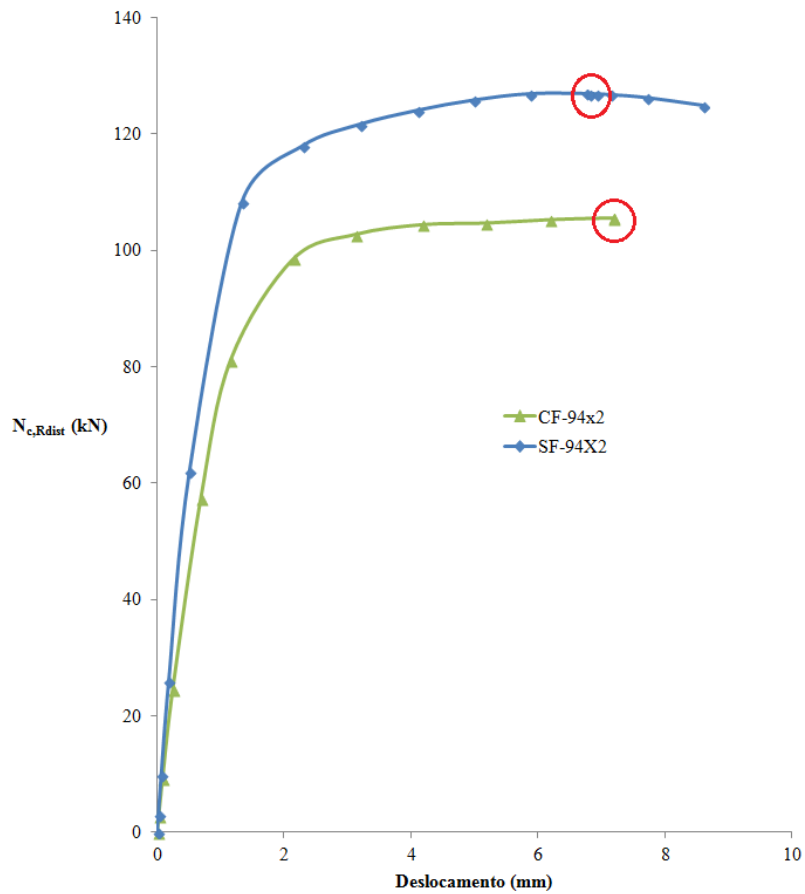


Figura 3.6- Carga versus Deslocamento para seções SF-94x2 e CF-94x2. $f_y = 400$ MPa. Em vermelho, destaca-se a força axial à compressão resistente dos protótipos.

3.3 Análise pela Teoria Generalizada de Vigas

Conforme descrito anteriormente, a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) se baseia na análise dos possíveis modos de flambagem de forma separada e a composição entre eles, além de possibilitar a avaliação da influência de cada modo no comportamento da coluna. Neste trabalho foi utilizado o software GBTUL versão 2.0.4.2 para análise das seções sem perfurações contidas na Tabela 3.1.

Definidos os dados de entradas e parâmetros da análise no GBTUL, foi feita a solução analítica considerando-se como condições de apoio as extremidades simplesmente apoiadas. A Figura 3.7 mostra gráfico carga crítica em função do comprimento para a seção SF-76x0,9.

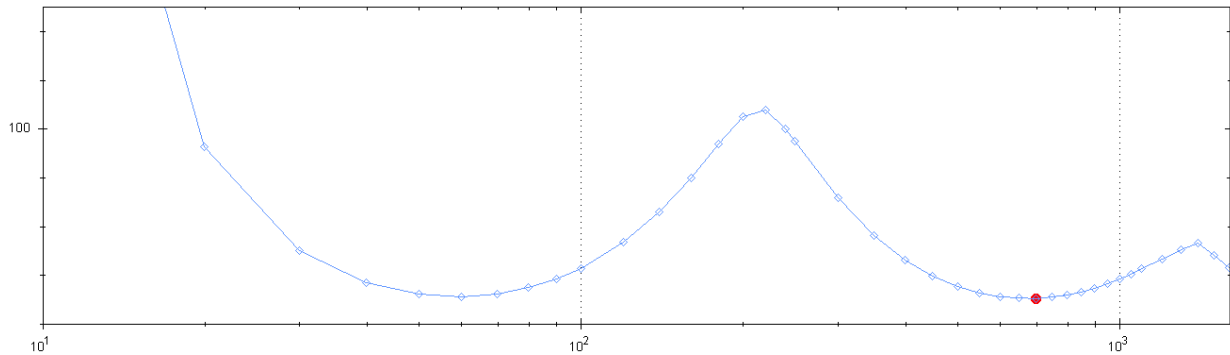


Figura 3.7- Carga crítica (kN) versus Comprimento (mm) para seção SF-76x0,9. GBTUL.

A carga crítica distorcional para essa seção (ponto vermelho no gráfico da Figura 3.7) é de 30,45 kN e o comprimento correspondente são 700mm. A Tabela 3.2 apresenta a carga crítica distorcional (N_{dist}) para as seções sem furos estudadas.

Tabela 3.2 - Força axial de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) – Seções sem furo, kN

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	30,45	30,2	29,3	28,87	27,09
	1,20	55,57	116,58	53,69	53,97	49,78
	1,80	132,14	131,25	127,91	126,3	119,77
	2,00	165,62	164,84	161,53	159,26	150,48
	2,25	214,76	213,44	208,42	205,89	195,98

Estes valores serão utilizados, no Método da Resistência Direta, para a obtenção da força axial à compressão resistente dos perfis sem perfurações e seus resultados serão comparados àqueles obtido numericamente pelo ANSYS, a fim de validar o procedimento numérico.

O próximo capítulo apresenta esta validação e, a partir dela, apresenta também a utilização do método da resistência direta para perfis com perfurações.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos. Primeiramente, será apresentada a comparação entre os resultados numéricos e os resultados normativos para colunas sem perfurações, com o objetivo de validar o procedimento. Uma vez validado, o modelo é então utilizado no estudo da viabilidade do emprego do método da resistência direta para o dimensionamento de perfis com perfurações.

4.1 Análise da coluna sem furos

O objetivo dessa fase foi calibrar um modelo numérico com o Método da Resistência Direta de acordo as prescrições do anexo C da NBR 14762:2010. Tais prescrições estão apresentadas no capítulo 2 deste trabalho.

Por meio das cargas críticas de flambagem distorcional (N_{dist}) obtidas via GBTUL foram calculadas as resistências das colunas pelos procedimentos previstos no anexo C da norma ($N_{c,Rdist-NBR}$) e seus resultados foram comparados aos resultados das resistências obtidos pela análise não linear via ANSYS ($N_{c,Rdist-ANSYS}$). O apêndice E apresenta os resultados das análises para as duas tensões de escoamento (f_y) adotadas neste trabalho, 400 MPa e 220 MPa.

A Figura 4.1 apresenta a curva de resistência conforme o Método da Resistência Direta citado anteriormente, juntamente com os resultados da análise dos 50 modelos feitos no ANSYS para as colunas sem furos enquanto a Tabela 4.1 apresenta os dados estatísticos da análise numérica. A razão entre as resistências prevista pela norma e a resistência obtida via ANSYS,

$\frac{N_{c,Rdist-NBR}}{N_{c,Rdist-ANSYS}}$, tem como valor médio, 1,119 e 1,202 e desvio padrão igual 0,067 e 0,071 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente.

Observa-se que os resultados numéricos apresentam boa correlação com os resultados normativos, em geral a favor da segurança.

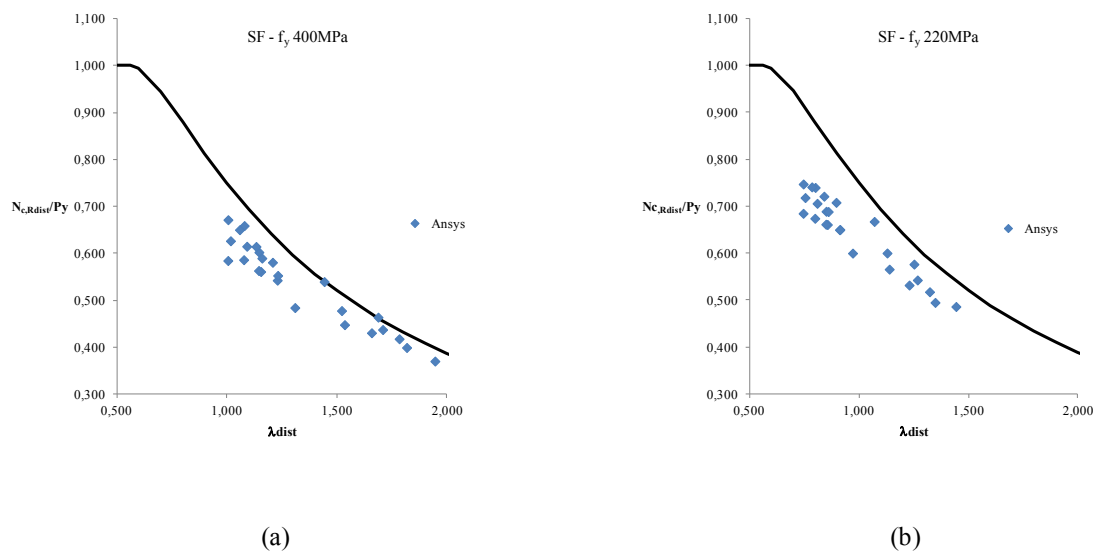


Figura 4.1 - Curvas de resistência conforme MRD em barras comprimidas versus resultados numéricos. (a) $f_y = 400$ MPa; (b) $f_y = 220$ MPa.

Tabela 4.1 - Dados estatísticos para colunas sem furos. MRD - flambagem distorcional

f_y (MPa)	N.º de modelos	$N_{c,Rdist-NBR} / N_{c,Rdist-ANSYS}$		
		Média	Variância	Desvio Padrão
400	25	1,119	0,005	0,067
220	25	1,202	0,005	0,071

A partir desses resultados, observa-se a viabilidade do modelo numérico para prever a força resistente das colunas. Assim, este procedimento será utilizado para avaliar a resistência de colunas com perfurações.

4.2 Análise da coluna com furos

A análise das colunas com perfurações iniciou-se com a utilização das equações propostas por Moen e Schafer (2009), MOEN 2 (Equação 3) e MOEN 4 (Equação 4). Em ambos os casos, a análise estabilidade elástica foi realizada no GBTUL, com o emprego, na alma da seção rack, da espessura fictícia ($t_{web,hole}$) proposta por Moen e Schafer (2009), apresentada na Equação 2.

Os tópicos a seguir, 4.2.1 e 4.2.2, apresentam os resultados da análise numérica de duas opções que foram utilizadas neste trabalho. Novamente, alerta-se que os termos das expressões estão apresentados conforme o texto original. Por vezes, a denominação dos termos é diferente ou não existe na norma brasileira. Quando possível, tais termos serão remetidos aos seus correspondentes na NBR 14762:2010.

4.2.1 MOEN 2 – (MOEN; SCHAFFER, 2009)

A Figura 4.2 apresenta a curva de resistência conforme proposta citado anteriormente, juntamente com os resultados da análise dos 50 modelos feitos no ANSYS para as colunas com furos enquanto a Tabela 4.2 apresenta os dados estatísticos da análise numérica. O apêndice F apresenta os resultados das análises para as duas tensões de escoamento (f_y) adotadas neste trabalho, 400 MPa e 220 MPa.

A razão entre as resistências pelo método proposto e a resistência obtida via ANSYS,

$\frac{P_{nd-MOEN2}}{P_{nd-ANSYS}}$, tem como valor médio, 1,157 e 1,216 e desvio padrão igual 0,092 e 0,070 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente.

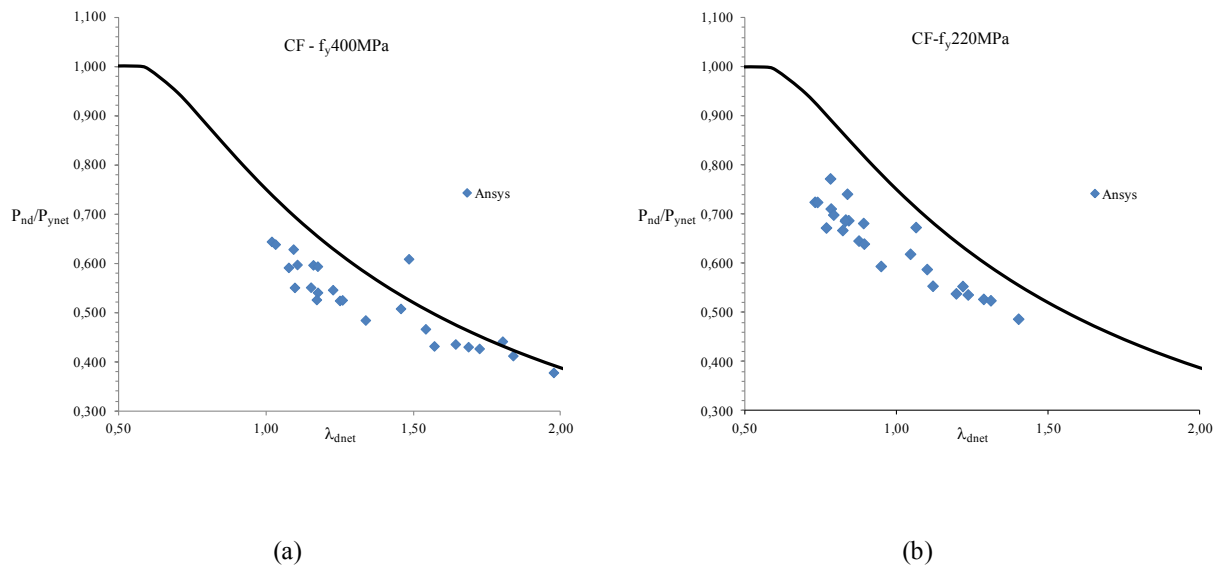


Figura 4.2 - Curvas de resistência conforme MOEN 2- em barras comprimidas versus resultados numéricos. (a) $f_y = 400$ MPa; (b) $f_y = 220$ MPa.

Tabela 4.2- Dados estatísticos para colunas com furos. MOEN 2 - flambagem distorcional

f_y (MPa)	N.º de modelos	$P_{nd-MOEN2} / P_{nd-ANSYS}$		
		Média	Variância	Desvio Padrão
400	25	1,157	0,008	0,092
220	25	1,216	0,005	0,070

4.2.2 MOEN 4 – (MOEN; SCHAFFER, 2009)

A Figura 4.3 apresenta a curva de resistência juntamente com os resultados da análise dos 50 modelos feitos no ANSYS para as colunas com furos enquanto a Tabela 4.3 apresenta os dados estatísticos da análise numérica. O apêndice G apresenta os resultados das análises para as duas tensões de escoamento (f_y) adotadas neste trabalho, 400 MPa e 220 MPa.

A razão entre as resistências pelo método proposto e a resistência obtida via ANSYS, $\frac{P_{nd-MOEN4}}{P_{nd-ANSYS}}$, tem como valor médio, 1,206 e 1,259 e desvio padrão igual 0,100 e 0,070 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente.

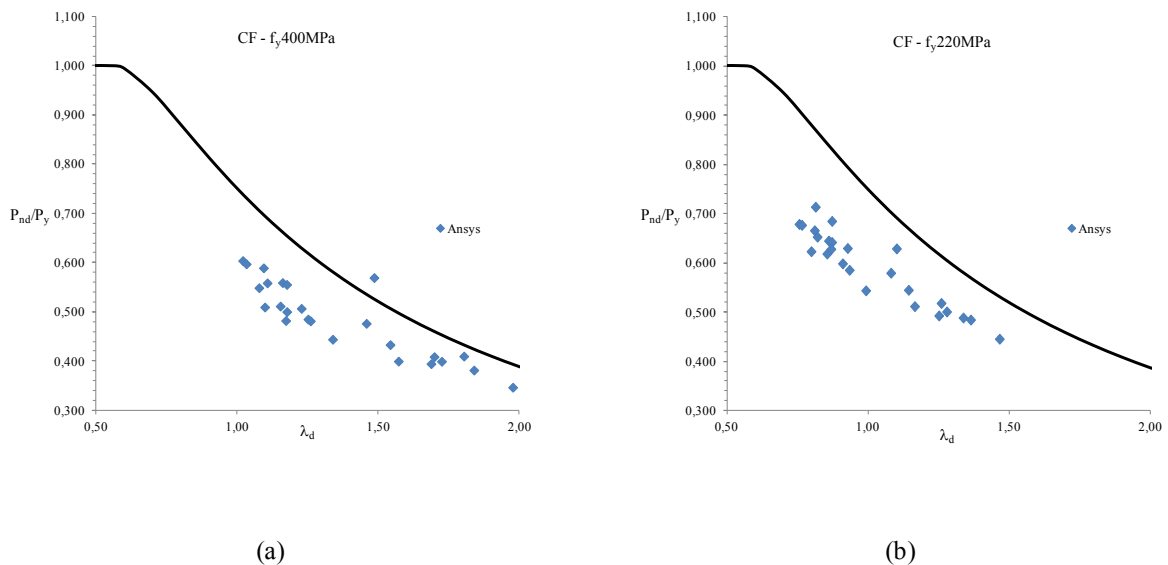


Figura 4.3- Curvas de resistência conforme MOEN 4- em barras comprimidas versus resultados numéricos. (a) f_y = 400 MPa; (b) f_y = 220 MPa.

Tabela 4.3- Estatística para colunas com furos. MOEN 4 - flambagem distorcional

f_y (Mpa)	N.º de modelos	$P_{nd-MOEN4} / P_{nd-ANSYS}$		
		Média	Variância	Desvio Padrão
400	25	1,206	0,010	0,100
220	25	1,259	0,005	0,070

Entre os métodos propostos por Moen e Schaffer (2009), observa-se que a opção MOEN 2, leva a uma melhor correlação entre os valores normativos e numéricos da força axial de compressão

resistente associada à flambagem distorcional, com média e desvio padrão entre as razões destes valores semelhantes ao obtido para a coluna sem furos.

Apesar de este resultado indicar a viabilidade da aplicação deste procedimento, visando obter uma melhor correlação entre os resultados normativos e numéricos, será proposta uma modificação da opção MOEN 2.

4.3 Proposta de modificação da MOEN 2 (Método alternativo proposto)

Apresenta-se a seguir uma modificação da proposição número 2 de Moen e Schaffer (2009) para obtenção da Força axial de flambagem distorcional elástica para seção com furos (P_{crd}). A proposta consiste na alteração do procedimento para a determinação da espessura fictícia da alma da seção ($t_{web, hole}$), substituindo a Equação 2 pela proposta apresentada na Equação 5 (t_{fic}). A seção transversal de todos os modelos estudados possui dois furos paralelos na alma cuja largura, b_h , de cada furo é $b_h = 0,1b_w$. Logo, o material remanescente na alma equivale a 80% da área desta. A Figura 4.4 apresenta a disposição dos furos na coluna e a seção transversal com o emprego da espessura fictícia, a partir da qual foram determinadas as forças axiais de flambagem distorcional elástica das seções por meio do GBTUL (Figura 4.5). No apêndice D estão apresentadas as espessuras fictícias para as seções utilizadas neste trabalho.

$$t_{fic} = \frac{A_{net}}{A_g} \times t_w$$

Equação 5

Onde,

A_g → Área bruta da seção transversal da barra;

A_{net} → Área líquida da seção transversal da barra;

t_w → Espessura original da alma da seção;

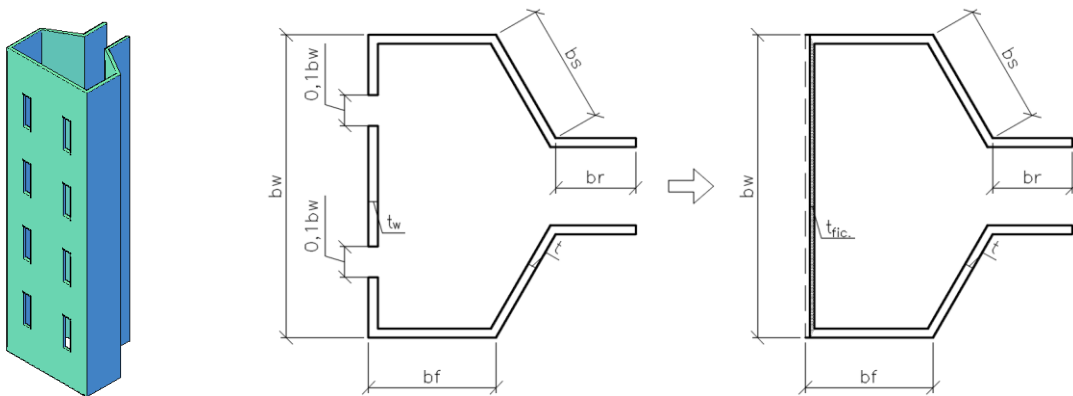


Figura 4.4- Furos na alma.

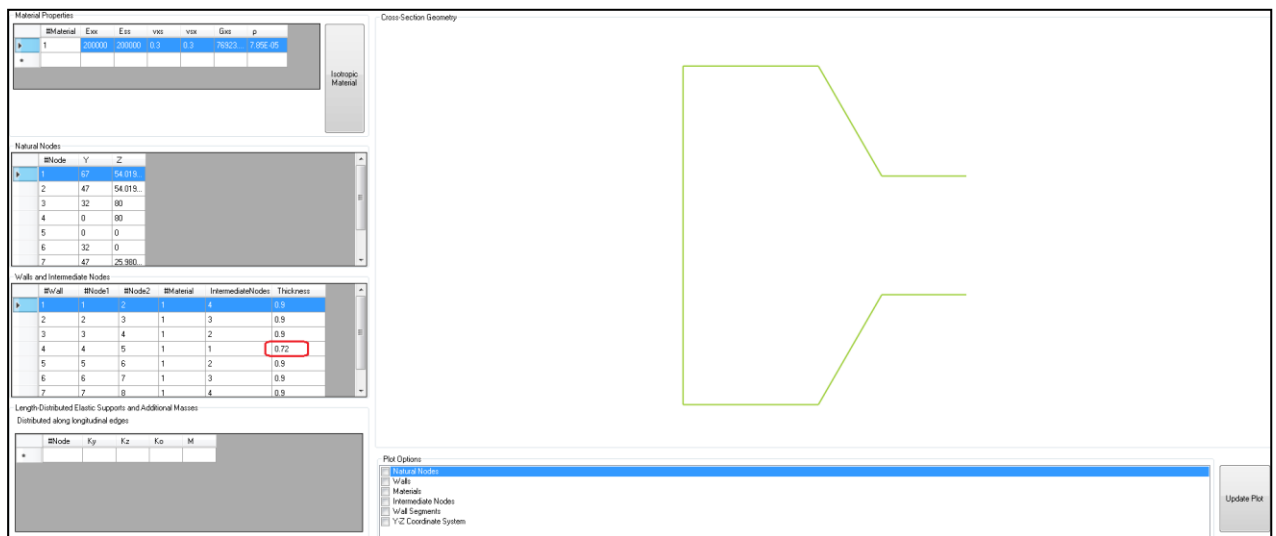


Figura 4.5 - Espessura fictícia proposta, t_{fic} .

De posse das novas espessuras fictícias (t_{fic}) da alma das seções estudadas obtêm-se, via GBTUL, as novas cargas axiais crítica de flambagem distorcional conforme apresentado na Tabela C.3 do apêndice C. Este item apresenta ainda, na Tabela C.2, as cargas críticas para as seções com furos considerando-se a espessura fictícia $t_{web,hole}$. Fazendo-se o comparativo entre tais tabelas, observa-se uma redução média de 23,78% da carga crítica distorcional quando se utiliza a espessura t_{fic} . Obtidos os dados citados acima e empregando-os na Equação 3, têm-se a resistência característica à compressão da seção pelo método alternativo aqui proposto ($P_{nd-ALTERN}$). A redução da carga crítica citada anteriormente resultará também na redução da resistência característica à compressão como podem ser vistas nas tabelas do apêndice H.

A Figura 4.6 apresenta a curva de resistência juntamente com os resultados da análise dos 50 modelos feitos no ANSYS para as colunas com furos enquanto a Tabela 4.4 apresenta os dados estatísticos da análise numérica.

A razão entre as resistências pelo método alternativo proposto e a resistência obtida via ANSYS, $\frac{P_{nd-ALTERN}}{P_{nd-ANSYS}}$, tem como valor médio, 1,019 e 1,093 e desvio padrão igual 0,090 e 0,079 para as tensões de escoamento de 400 MPa e 220 MPa, respectivamente.

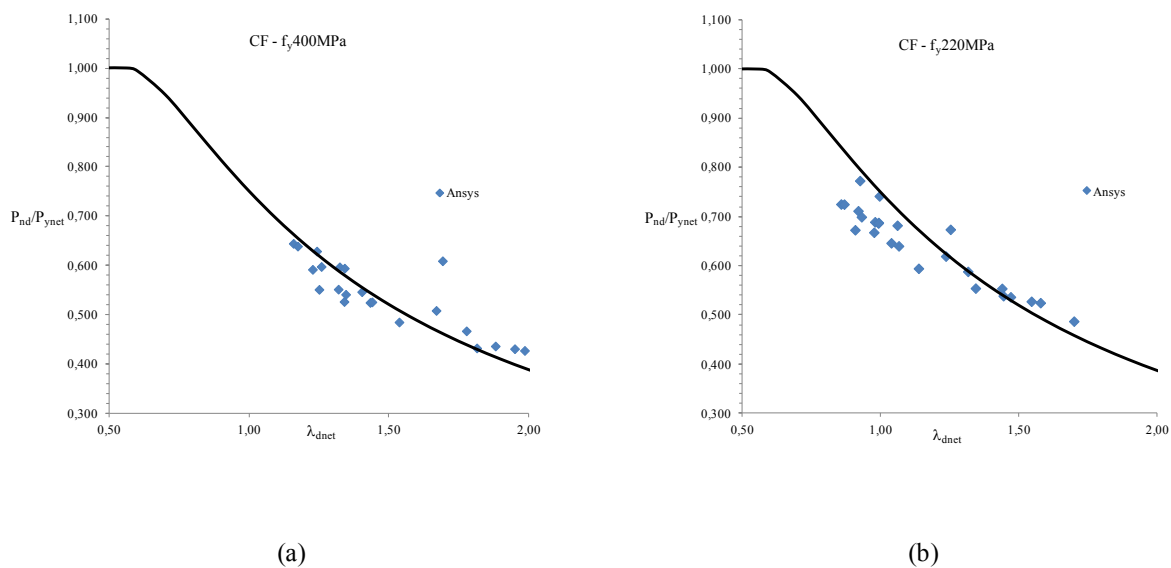


Figura 4.6- Curvas de resistência - método alternativo- em barras comprimidas versus resultados numéricos. (a) $f_y = 400$ MPa; (b) $f_y = 220$ MPa.

Tabela 4.4- Dados estatísticos para colunas com furos. Método alternativo - flambagem distorcional

f_y (MPa)	N.º de modelos	$P_{nd-ALTERN.} / P_{nd-ANSYS}$		
		Média	Variância	Desvio Padrão
400	25	1,019	0,008	0,090
220	25	1,093	0,006	0,079

4.4 Comparação dos resultados

Neste item relatam-se as comparações dos resultados entre as prescrições teóricas apresentadas no capítulo 4 e nos apêndices E, F, G e H e o modelo numérico apresentado no capítulo 3.

Os resultados da resistência à compressão segundo o método alternativo são os que mais se aproximam dos resultados do modelo numérico ANSYS independente da tensão de escoamento considerada. Na média, as resistências neste método são 1,9% ($f_y = 400$ MPa) e 9,3% ($f_y = 220$ MPa) maiores que as obtidas pelo modelo numérico conforme mostrado na Tabela 4.4. Considerando-se MOEN 2, as resistências são 15,7% ($f_y = 400$ MPa) e 21,6% ($f_y = 220$ MPa) maiores que as obtidas pela análise numérica, enquanto que para MOEN 4, as resistências são 20,6% ($f_y = 400$ MPa) e 25,9% ($f_y = 220$ MPa) maiores.

Comparando-se os resultados do método alternativo proposto com os métodos MOEN 2 e MOEN 4, observa-se que a razão entre as resistências das colunas obtidas pelo método alternativo e os resultados das resistências obtidos pela análise não linear via ANSYS aproximam-se da unidade (Figura 4.7 e Figura 4.8), indicando a viabilidade da proposição.

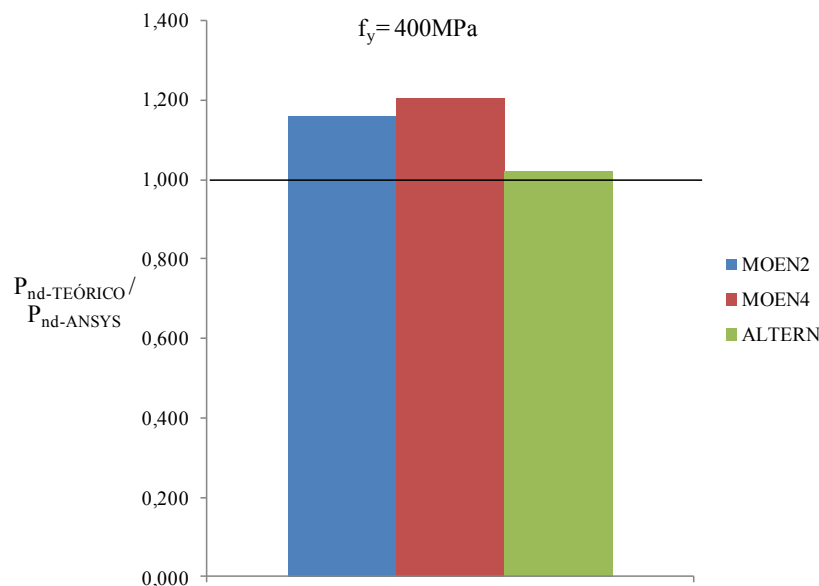


Figura 4.7 - Média da razão das resistências entre Teoria e Análise Numérica. $f_y = 400$ MPa.

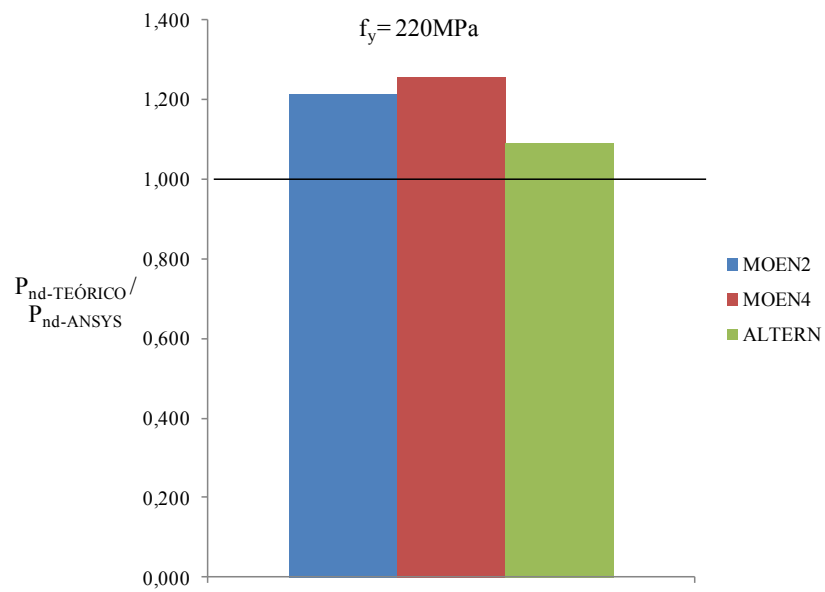


Figura 4.8 - Média da razão das resistências entre Teoria e Análise Numérica. $f_y = 220\text{MPa}$.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os perfis de aço formados a frio são amplamente utilizados na construção civil devido à rapidez e baixo custo de fabricação, à facilidade na conformação das chapas, ao grande número de fornecedores e à variedade de seções transversais. A análise e dimensionamento desses têm sido tratados em diversos estudos com a finalidade de prever seu comportamento e ampliar os entendimentos quanto aos modos de flambagem local, distorcional e global.

Neste trabalho propôs-se a análise da resistência de perfis tipo rack com perfurações na alma submetidos à compressão centrada sujeitos à flambagem distorcional. Empregou-se o Método da Resistência Direta, previsto no anexo C da NBR 14762:2010 com base em estudos anteriores que indicaram a possibilidade de sua utilização.

Primeiramente foram analisadas colunas sem perfurações. Suas forças axiais de flambagem elástica associadas ao modo distorcional foram obtidas através da Teoria Generalizada de Vigas e suas forças axiais de compressão resistente foram determinadas via método da resistência direta. Estes valores foram comparados com resultados via elementos finitos, obtidos no ANSYS, para a validação do modelo numérico.

Em uma segunda etapa, o modelo numérico validado foi utilizado para a avaliação das adaptações do Método da Resistência Direta para colunas com perfurações. Três opções de adaptação foram consideradas. Duas propostas em um trabalho anterior (MOEN 2 e MOEN 4) e uma proposta neste trabalho.

Observou-se que a proposta MOEN 2 levou a resultados com boa correlação entre os resultados numéricos e os determinados pelo método da resistência direta adaptado, aproximando-se da correlação obtida para as colunas sem perfurações, o que indica a sua viabilidade. No entanto, o mesmo não ocorreu para a hipótese MOEN 4.

Buscando uma melhor correlação entre resultados numéricos e normativos foi então proposta uma terceira adaptação para o método da resistência direta. Esta modificação levou a resultados com melhor correlação que as duas anteriores.

A análise das três situações indicou a viabilidade da adaptação do método da resistência direta para o dimensionamento de perfis com perfurações. Ressalta-se, no entanto, que a necessidade de realização de análise de estabilidade neste método ainda o torna pouco utilizável em procedimentos práticos.

Apresentam-se a seguir, sugestões para continuidade deste trabalho:

- Avaliação de outras seções transversais comumente aplicadas em estruturas, como por exemplo, Seção U enrijecido;
- Proceder a variação nas dimensões dos furos na alma do perfil;
- Elaborar novas análises utilizando-se novos fatores de imperfeição aplicados ao perfil;
- Aprofundar a análise da influência das condições de contorno da coluna nos resultados da seção.

6 REFERÊNCIAS

ÁGUIA SISTEMAS. Disponível em: <<http://www.aguiasistemas.com.br/aguiasistemas/>>
Acesso em: maio 2016.

ALMEIDA, P. H. F. **Estudo numérico de um dispositivo de transferência de cargas em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**. Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892**. Materiais metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**. Dimensionamento de Estruturas de Aço constituídas por Perfis Formados a Frio – Procedimento. Rio de Janeiro, 2010.

BEBIANO R.; CAMOTIM D, PINA P.; SILVESTRE N. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**. DECivil/IST, Technical University of Lisbon, Lisbon, 2008. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>>.

CAI J.; MOEN, C. D. Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. **Thin-Walled Structures**, v. 107, p. 274-286, 2016.

CARVALHO, P. R. DE; GRICOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso Básico de Perfis Formados a Frio**. 3ª Edição. Porto Alegre: Ed. Porto Alegre, 2014. 371 p.

CASTELANI, T. **Otimização e dimensionamento de perfis formados a frio pelo método da resistência direta**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DASSAULT SYSTÈMES. ABAQUS. Standard Version 6.7.1. Providence: 2007. Disponível em: <<http://www.simulia.com/>>.

DÔRES, A. G. R. das. **Análise de elementos estruturais com seção transversal de parede fina aberta ramificada utilizando a Teoria Generalizada de Vigas (Generalised Beam Theory)**. 2014. Tese (Doutorado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FARIA V. DE O.; MIRANDA, S. A.; SOUZA, F. T.; SARMANHO, A. M. Análise de perfis formados a frio com perfurações sob compressão centrada. **Revista da Estrutura de Aço**, Rio de Janeiro, v. 4, p. 163-180, 2015.

FARIA, V. DE O. **Análise da estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T.; SILVA, G. G ; FARIA, V. O. Theoretical and experimental analysis of perforated rack columns. **REM. Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 66, p. 289-294, 2013.

FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T. Theoretical analysis of perforated rack columns. **International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures. Proceedings of International Colloquium Stability and Ductility of Steel Structures**, Rio de Janeiro, v. 2. p. 953-960, 2010.

FREITAS, A. M. S.; FREITAS, M. S. R.; SOUZA, F. T. Analysis of steel storage rack columns. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 61, p. 1135 –1146, 2005.

JAVARONI, C. E. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: Análise técnica experimental**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MAIA, W. F. **Análise Teórica e Experimental de Barras em Dupla Cantoneira de Aço Formada a Frio Submetidas à Compressão**. 2012. 261 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MECALUX. Disponível em: <<http://www.mecalux.com.br>> Acesso em: maio 2016.

MOEN, C.D.; SCHAFER, B.W. **Direct Strength Design of Cold-Formed Steel members with perforations**: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute –

Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2009. 540 p.

OLIVEIRA, A. M. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack's)**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

SCHAFER, B. Local, distortional and Euler buckling of thin-walled columns. **Journal of Structural Engineering**, v.128, p. 289-299, 2002.

SCHAFER, B.W.; ÁDÀNÝ, S. Buckling analysis of cold formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. **Eighteenth International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures**. Orlando, USA, v.1, n. 1, p.38-54, 2006

SCHARDT, R. Generalised Beal Theory – An Adequate method for Coupled Stability Problems. **Thin-Walled Structures**, v. 19, p. 161-180, 1994a.

SCHARDT, R. Lateral-torsional and distortional buckling of channel and hat-sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 31, p. 243-265, 1994b.

SILVA, A. C. DA. **Estudo de Ligações Parafusadas em Perfis Formados a Frio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

SILVA, G. G. DA. **Análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SILVA, V. P.; PIERIN, I.; SILVA, E. L. **Estruturas compostas por perfis formados a frio - Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2014. 192 p.

SILY, B. T. P. **Avaliação probabilística da resistência à compressão axial de perfis de aço formados a frio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUZA, F. T. DE. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. 2013. 194 f. Tese (Doutorado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SOUZA, F. T. DE. **Análise teórico-experimental de sistemas apertados com elementos perfurados em perfis formados a frio - Racks**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

SSMA - Steel Stud Manufacturers Association. Product Technical Information, ICBO ER-4943P. Disponível em: <<http://www.ssm.com>>. Acesso em: ago. 2016.

SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC. ANSYS. Vs. 14.5. Houston, USA: 2012. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>.

TUNER, M. J.; CLOUGH, R. W.; MARTIN, H. C.; TOPP, L. C. Stiffness and deflection analysis of complex structures. **Journal os Aerospace Science**, v. 23, n. 9, p. 805-824, 1956.

VAZQUEZ, E. G. **Estabilidade e resistência de perfis de chapa dobrada afetados pelo modo distorcional**. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

APÊNDICES

A. APDL – SEÇÕES SEM FUROS

finish

/clear

/FILNAME, INTRO-IMP, 1 !NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA

/NOPR

/PMETH,OFF,0

KEYW,PR_SET,1

KEYW,PR_STRUC,1

KEYW,PR_THERM,0

KEYW,PR_FLUID,0

KEYW,PR_ELMAG,0

KEYW,MAGNOD,0

KEYW,MAGEDG,0

KEYW,MAGHFE,0

KEYW,MAGELC,0

KEYW,PR_MULTI,0

KEYW,PR_CFD,0

/GO

!OPÇÕES DE VISUALIZAÇÃO (PONTO DE VISTA)

/VIEW,1,0.3,0.50,-1

=====

!PARAMETROS

=====

/PREP7

ESP=0.9 !ESPESSURA

B=76 !LARGURA DA ALMA

LF1=32 !LARGURA DO FLANGE

LF2=20 !LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO

LEX=15 !PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR (LE*COS THETA)

LEY=26 !PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR (LE*SEN THETA)

DIF=0 !DIFERENÇA NA ABERTURA

L=700 !COMPRIMENTO DO PROTOTIPO

TC=6.3 !ESPESSURA DA CHAPA DE EXTREMIDADE

XG=23.9 ! X DO CG

YG=B/2 ! Y DO CG

=====

!ELEMENTO E MATERIAL

=====

MOD_EST=200000 !MODULO ELASTICIDADE PERFIL

MOD_EST2=100*MOD_EST !MODULO ELASTICIDADE PLACAS

FY=400 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)

FU=500 !TENSÃO ÚLTIMA (MPa)

EY=0.7*FY/MOD_EST !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

ET,1,SHELL181

KEYOPT,1,1,0

KEYOPT,1,3,0

KEYOPT,1,8,0

KEYOPT,1,9,0

ET,2,SOLID45

R,1,ESP, , , , ,

MPTEMP, 1, , , , ,

MPDATA,EX,1,,MOD_EST

MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP, 1, , , , ,

MPDATA,EX,2,,MOD_EST2

MPDATA,PRXY,2,,0.3

!=====

!GERACAO DAS AREAS

!=====

K,1,, , ,

K,2,B, , ,

K,3,B,,LF1,

K,4,B-LEY,,LF1+LEX,

K,5,B-LEY-DIF/2,,LF1+LEX+LF2,

K,6,LEY+DIF/2,,LF1+LEX+LF2,

K,7,LEY,,LF1+LEX,

K,8,0,,LF1,

KGEN,2,1,8,1, ,L, , , 0

A,2,10,11,3

A,4,3,11,12

A,5,4,12,13

A,6,7,15,14

A,8,7,15,16

A,8,1,9,16

A,1,2,10,9

!=====

!PLACAS DE EXTREMIDADE

!=====

BLOCK,-20,B+20,0,-TC,XG-((B+40)/2), XG+((B+40)/2)

BLOCK,-20,B+20,L,L+TC,XG-((B+40)/2), XG+((B+40)/2)

!=====

!ATRIBUIÇÃO DE PROPRIEDADES

!=====

```

FLST,5,7,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, 1, 2, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

```

```

!=====
!GERACAO DAS MALHAS DA COLUNA E DAS PLACAS
!=====

```

```

AESIZE,ALL,B/10,
MSHKEY,0
FLST,5,7,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
MSHKEY,0

```



```

MSHAPE,1,3d
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

```

=====
!ACOPLAMENTO - SOLDA ENTRE A CHAPA E A COLUNA
=====

```

```

ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,+0.1
CPINTF,ALL,4,

```

```

ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
CPINTF,ALL,4,

```

```

=====
!APLICACAO DAS RESTRICOES
=====

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,TC+1
D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L+TC-1,L+TC+1
D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L/2-((B/20)-0.1),L/2+(B/20)
NSEL,R,LOC,X,B/2-(B/20),B/2+(B/20)
D, ALL, UY, 0, , , , , ,
ALLSEL,ALL

```

```

=====
!ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS PLACAS - RETIRAR AO CONSIDERAR PLACAS
ROTULADAS
=====

```

```

!NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,-TC+1
!CP,NEXT,UY,ALL

!NSEL,S,LOC,Y,L+TC+1,L+TC-1

```

```
!CP,NEXT,UY,ALL
!ALLSEL,ALL
```

```
!=====
!APLICACAO DAS CARGAS
!=====
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,-TC+1
*GET,NOS,NODE,0,COUNT
F,ALL,FY,1/NOS
```

```
NSEL,S,LOC,Y,L+TC+1,L+TC-1
F, ALL, FY, -1/NOS,
ALLSEL,ALL
```

```
!=====
!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA
!=====
```

```
/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,1
SOLVE
```

```
FINISH
/SOLU
ANTYPE,1
BUCOPT,LANB,20,0,0
MXPAND,20,0,0,0,0.001,
SOLVE
```

```
FINISH
```

```
EPLOT
```

```
!=====
!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)
!=====
```

```
/PREP7
!UPGEOM,ESP,1,1,'INTRO-IMP','rst',' '
UPGEOM,ESP,1,20,'INTRO-IMP','rst',' '
```

```
!=====
!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR
!=====
```

```
TB,MISO,1,1,4,0
TBTEMP,0
TBPT,,EY,0.7*FY
TBPT,,3*EY,FY
TBPT,,10*EY,1.01*FY
TBPT,,100*EY,FU
```

```
=====
! SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE 50kN
!=====
```

```
P=50000
```

```
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,50,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,P
ARCLN,1,0,0
ARCTRM,U,8,,UX
AUTOTS,-1.0
```

```
FDELE, ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,L-1,L+1
F, ALL, FY, -P/NOS,
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-1,1
F, ALL, FY, P/NOS,
ALLSEL,ALL
```

```
SOLVE
```

B. APDL – SEÇÕES COM FUROS

```
finish
/clear
```

```
/FILNAME, INTRO-IMP, 1 !NOME DO ARQUIVO DE SAÍDA
```

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
```

```
!OPÇÕES DE VISUALIZAÇÃO (PONTO DE VISTA)
```

```
/VIEW,1,0.3,0.50,-1
```

```
!=====
!PARAMETROS
!=====
```

```
/PREP7
```

```
REL=0.4 !RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO DO FURO E A LARGURA DA
ALMA
```

```
ESP=0.9 !ESPESSURA
```

```
B=76 !LARGURA DA ALMA
```

```
LF1=32 !LARGURA DO FLANGE
```

```
LF2=20 !LARGURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO
```

```
LEX=15 !PROJEÇÃO HORIZONTAL DO ENRIJECEDOR (LE*COS THETA)
```

```
LEY=26 !PROJEÇÃO VERTICAL DO ENRIJECEDOR (LE*SEN THETA)
```

```
DIF=0 !DIFERENÇA NA ABERTURA
```

```
h=REL*B !ALTURA DO FURO
```

```
LI=700 !COMPRIMENTO INICIAL DO PROTOTIPO DESCONSIDERANDO A
COMPATIBILIDADE COM O NUMERO DE FUROS
```

```
N=(LI-MOD(LI,h))/h !NÚMERO INTEIRO DE INTERVALO
```

```
RESTO=MOD(N,2) !N É PAR/IMP?. SE RESTO DA DIV N/2=0, PAR
```

```
*IF,RESTO,EQ,0,THEN
```

```
L=N*h !COMPR. NEC. DO PROTOTIPO QDO N É PAR
```

```
*ELSE
```

```
L=(N+1)*h ! COMPR. NEC. DO PROTOTIPO QDO N É IMPAR
```

```
*ENDIF
```

```
TC=6.3 !ESPESSURA DA CHAPA DE EXTREMIDADE
```

XG=25.53 ! X DO CG***
 YG=B/2 ! Y DO CG

!=====

!ELEMENTO E MATERIAL

!=====

MOD_EST=200000 !MODULO ELASTICIDADE PERFIL
 MOD_EST2=100*MOD_EST !MODULO ELASTICIDADE PLACAS
 FY=400 !TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)
 FU=500 !TENSÃO ÚLTIMA (MPa)
 EY=0.7*FY/MOD_EST !DEFORMAÇÃO NO ESCOAMENTO

ET,1,SHELL181

KEYOPT,1,1,0
 KEYOPT,1,3,0
 KEYOPT,1,8,0
 KEYOPT,1,9,0

ET,2,SOLID45

R,1,ESP, , , , ,

MPTEMP, 1, , , , ,
 MPDATA,EX,1,,MOD_EST
 MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP, 1, , , , ,
 MPDATA,EX,2,,MOD_EST2
 MPDATA,PRXY,2,,0.3

!=====

!GERACAO DAS AREAS

!=====

K,1,,,
 K,2,B,,,
 K,3,B,,LF1,
 K,4,B-LEY,,LF1+LEX,
 K,5,B-LEY-DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,6,LEY+DIF/2,,LF1+LEX+LF2,
 K,7,LEY,,LF1+LEX,
 K,8,0,,LF1,

KGEN,2,1,8,1, ,L , , ,0

A,2,10,11,3
 A,4,3,11,12
 A,5,4,12,13
 A,6,7,15,14
 A,8,7,15,16
 A,8,1,9,16
 A,1,2,10,9

```

=====
!INSERCAO DOS FUROS
=====

```

```

*DO, Y, REL*B/2, L-REL*B/2,2*REL*B
      BLC4,2*B/10,Y,B/10,REL*B
      BLC4,(B-(3*B/10)),Y,B/10,REL*B
*ENDDO

```

```

ASEL,S,LOC,Z,0
ASBA,7,ALL
ALLSEL, ALL

```

```

=====
!PLACAS DE EXTREMIDADE
=====

```

```

BLOCK,-20,B+20,0,-TC,XG-((B+40)/2), XG+((B+40)/2)
BLOCK, -20,B+20,L,L+TC,XG-((B+40)/2), XG+((B+40)/2)

```

```

=====
!ATRIBUIÇÃO DE PROPRIEDADES
=====

```

```

VATT, 2, 1, 2, 0

```

```

ASLV,U
AATT, 1, 1, 1, 0,
ALLSEL, ALL

```

```

=====
!GERACAO DAS MALHAS DA COLUNA E DAS PLACAS
=====

```

```

AESIZE, ALL, B/10,

```

```

ASLV,U
MSHKEY, 0
AMESH, ALL,,
EPLOT
!*
ALLSEL, ALL
MSHAPE,1,2D
MSHAPE,1,3D
vMESH, ALL,,

```

```

=====
!ACOPLAMENTO - SOLDA ENTRE A CHAPA E A COLUNA
=====

```

```

ALLSEL,ALL

```

```
NSEL,S,LOC,Y,-0.1,+0.1
CPINTF,ALL,4,
```

```
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L-0.1,L+0.1
CPINTF,ALL,4,
```

```
!=====
!APLICACAO DAS RESTRICOES
!=====
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,TC+1
D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L+TC-1,L+TC+1
D, ALL, UX, 0, , , , UZ, , , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,L/2-((B/20)-0.1),L/2+(B/20)
NSEL,R,LOC,X,B/2-(B/20),B/2+(B/20)
D, ALL, UY, 0, , , , , ,
ALLSEL,ALL
```

```
!=====
!ACOPLAMENTO DOS NÓS DAS PLACAS - RETIRAR AO CONSIDERAR PLACAS
ROTULADAS
!=====
```

```
!NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,-TC+1
!CP,NEXT,UY,ALL
```

```
!NSEL,S,LOC,Y,L+TC+1,L+TC-1
!CP,NEXT,UY,ALL
!ALLSEL,ALL
```

```
!=====
!APLICACAO DAS CARGAS
!=====
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-TC-1,-TC+1
*GET,NOS,NODE,0,COUNT
F,ALL,FY,1/NOS
```

```
NSEL,S,LOC,Y,L+TC+1,L+TC-1
F, ALL, FY, -1/NOS,
ALLSEL,ALL
```

```
!=====
!SOLUCAO DO PROBLEMA DE FLAMBAGEM ELASTICA
!=====
```

```
/SOLU
ANTYPE,0
PSTRES,1
```

SOLVE

FINISH

/SOLU

ANTYPE,1

BUCOPT,LANB,20,0,0

MXPAND,20,0,0,0,0.001,

SOLVE

FINISH

EPlot

```
!=====
!ATUALIZACAO DA GEOMETRIA (INTRODUCAO DE IMPERFEIÇÕES)
!=====
```

/PREP7

!UPGEOM,ESP,1,1,'INTRO-IMP','rst',''

UPGEOM,ESP,1,17,'INTRO-IMP','rst',''

```
!=====
!INTRODUÇÃO DO DIAGRAMA TENSAO-DEFORMAÇÃO MULTILINEAR
!=====
```

TB,MISO,1,1,4,0

TBTEMP,0

TBPT,,EY,0.7*FY

TBPT,,3*EY,FY

TBPT,,10*EY,1.01*FY

TBPT,,100*EY,FU

```
!=====
! SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COM APLICAÇÃO DE 50kN
!=====
```

P=50000

/SOL

ANTYPE,0

NLGEOM,1

NSUBST,50,0,0

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL

TIME,P

ARCLEN,1,0,0

ARCTRM,U,8,,UX

AUTOTS,-1.0

FDELE, ALL

NSEL,S,LOC,Y,L-1,L+1


```
F, ALL, FY, -P/NOS,  
ALLSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-1,1  
F, ALL, FY, P/NOS,  
ALLSEL,ALL
```

```
SOLVE
```

C. FORÇA AXIAL CRÍTICA DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL ELÁSTICA

Tabela C.1- Carga crítica distorcional (Ndist) – Seções sem furo, kN

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	30,45	30,2	29,3	28,87	27,09
	1,20	55,57	116,58	53,69	53,97	49,78
	1,80	132,14	131,25	127,91	126,3	119,77
	2,00	165,62	164,84	161,53	159,26	150,48
	2,25	214,76	213,44	208,42	205,89	195,98

Tabela C.2- Carga crítica distorcional (Ndist) – Seções com furo considerando espessura fictícia t_{web,hole}, kN

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	29,99	29,57	28,59	28,13	26,19
	1,20	54,29	53,18	52,14	51,39	47,94
	1,80	128,58	127,41	123,57	121,72	114,38
	2,00	161,02	159,84	155,71	153,06	143,47
	2,25	208,33	206,64	200,62	197,65	186,47

Tabela C.3- Carga crítica distorcional (Ndist) – Seções com furo considerando espessura fictícia t_{fic}, kN

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	22,90	22,30	21,35	20,95	19,44
	1,20	41,40	40,97	39,25	38,53	35,89
	1,80	98,85	97,87	94,54	92,78	86,74
	2,00	124,78	123,59	118,89	116,90	109,81
	2,25	161,43	159,87	154,63	152,36	142,65

D. ESPESSURA FICTÍCIA

Tabela D.1- Espessura fictícia ($t_{web,hole}$) conforme proposição de Moen, mm.

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	0,887	0,886	0,884	0,883	0,880
	1,20	1,179	1,167	1,174	1,173	1,170
	1,80	1,763	1,761	1,754	1,751	1,746
	2,00	1,954	1,951	1,949	1,945	1,934
	2,25	2,198	2,195	2,186	2,181	2,167

Tabela D.2- Espessura fictícia ($t_{fic.}$) conforme proposição do autor, mm

b_w (mm)		76	80	94	100	120
t (mm)	0,90	0,720	0,720	0,720	0,720	0,720
	1,20	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960
	1,80	1,440	1,440	1,440	1,440	1,440
	2,00	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
	2,25	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800

E. RESULTADOS – SEÇÕES SEM FUROS

Tabela E.1- Resultados da análise numérica. $f_y = 400\text{MPa}$

Seção	N_{dist} (kN)	A (mm ²)	$P_y = Af_y$ (kN)	λ_{dist}	$N_{c,R\text{dist-NBR}}$ (kN)	$N_{c,R\text{dist-ANSYS}}$ (kN)	$N_{c,R\text{dist-NBR}} / N_{c,R\text{dist-ANSYS}}$
			$f_y = 400\text{ Mpa}$				
SF-76x0,9	30,45	216,00	86,40	1,685	40,03	40,10	0,998
SF-76x1,2	55,57	288,00	115,20	1,440	62,38	62,19	1,003
SF-76x1,8	132,14	432,00	172,80	1,144	115,80	104,15	1,112
SF-76x2	165,62	480,00	192,00	1,077	135,51	126,57	1,071
SF-76x2,25	214,76	540,00	216,00	1,003	161,63	145,11	1,114
SF-80x0,9	30,20	219,60	87,84	1,705	40,19	38,45	1,045
SF-80x1,2	116,58	292,80	117,12	1,002	87,68	68,50	1,280
SF-80x1,8	131,25	439,20	175,68	1,157	116,53	103,64	1,124
SF-80x2	164,84	488,00	195,20	1,088	136,53	120,09	1,137
SF-80x2,25	213,44	549,00	219,60	1,014	162,82	137,66	1,183
SF-94x0,9	29,30	232,20	92,88	1,780	40,67	38,83	1,047
SF-94x1,2	53,69	309,60	123,84	1,519	63,64	59,21	1,075
SF-94x1,8	127,91	464,40	185,76	1,205	118,82	107,93	1,101
SF-94x2	161,53	516,00	206,40	1,130	139,72	126,88	1,101
SF-94x2,25	208,42	580,50	232,20	1,055	166,63	151,04	1,103
SF-100x0,9	28,87	237,60	95,04	1,814	40,81	37,97	1,075
SF-100x1,2	53,97	316,80	126,72	1,532	64,56	56,79	1,137
SF-100x1,8	126,30	475,20	190,08	1,227	119,64	103,19	1,159
SF-100x2	159,26	528,00	211,20	1,152	140,66	118,56	1,186
SF-100x2,25	205,89	594,00	237,60	1,074	168,01	139,37	1,205
SF-120x0,9	27,09	255,60	102,24	1,943	40,89	37,89	1,079
SF-120x1,2	49,78	340,80	136,32	1,655	64,31	58,74	1,095
SF-120x1,8	119,77	511,20	204,48	1,307	121,44	99,08	1,226
SF-120x2	150,48	568,00	227,20	1,229	142,79	125,60	1,137
SF-120x2,25	195,98	639,00	255,60	1,142	171,49	144,02	1,191

Tabela E.2- Resultados da análise numérica. $f_y = 220\text{MPa}$

Seção	N_{dist} (kN)	A (mm ²)	$P_y = Af_y$ (kN)	λ_{dist}	$N_{c,R\text{dist-NBR}}$ (kN)	$N_{c,R\text{dist-ANSYS}}$ (kN)	$N_{c,R\text{dist-NBR}} / N_{c,R\text{dist-ANSYS}}$
			$f_y = 220\text{ Mpa}$				
SF-76x0,9	30,45	216,00	47,52	1,249	29,42	27,42	1,073
SF-76x1,2	55,57	288,00	63,36	1,068	45,03	42,32	1,064
SF-76x1,8	132,14	432,00	95,04	0,848	80,53	65,54	1,229
SF-76x2	165,62	480,00	105,60	0,798	93,03	78,19	1,190
SF-76x2,25	214,76	540,00	118,80	0,744	109,03	88,83	1,227
SF-80x0,9	30,20	219,60	48,31	1,265	29,57	26,24	1,127
SF-80x1,2	116,58	292,80	64,42	0,743	59,14	44,14	1,340
SF-80x1,8	131,25	439,20	96,62	0,858	81,23	66,57	1,220
SF-80x2	164,84	488,00	107,36	0,807	93,96	75,85	1,239
SF-80x2,25	213,44	549,00	120,78	0,752	110,17	86,81	1,269
SF-94x0,9	29,30	232,20	51,08	1,320	30,04	26,46	1,135
SF-94x1,2	53,69	309,60	68,11	1,126	46,25	40,91	1,131
SF-94x1,8	127,91	464,40	102,17	0,894	83,47	72,39	1,153
SF-94x2	161,53	516,00	113,52	0,838	96,94	81,93	1,183
SF-94x2,25	208,42	580,50	127,71	0,783	113,87	94,70	1,202
SF-100x0,9	28,87	237,60	52,27	1,345	30,20	25,89	1,166
SF-100x1,2	53,97	316,80	69,70	1,136	46,96	39,46	1,190
SF-100x1,8	126,30	475,20	104,54	0,910	84,31	67,97	1,240
SF-100x2	159,26	528,00	116,16	0,854	97,96	76,83	1,275
SF-100x2,25	205,89	594,00	130,68	0,797	115,29	88,16	1,308
SF-120x0,9	27,09	255,60	56,23	1,441	30,43	27,36	1,112
SF-120x1,2	49,78	340,80	74,98	1,227	47,17	39,91	1,182
SF-120x1,8	119,77	511,20	112,46	0,969	86,47	67,52	1,281
SF-120x2	150,48	568,00	124,96	0,911	100,65	81,32	1,238
SF-120x2,25	195,98	639,00	140,58	0,847	119,23	93,06	1,281

F. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MOEN 2

Tabela F. 1- Resultados da análise numérica. $f_y = 400\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A_{net} (mm^2)	$P_{\text{ynet}} = A_{\text{net}} f_y$ (kN)	λ_{dnet}	$P_{\text{nd-OP2}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ANSYS}}$ (kN)	$P_{\text{nd-OP2}} / P_{\text{nd-ANSYS}}$
			$f_y = 400 \text{ Mpa}$				
CF-76x0,9	29,99	202,32	80,93	1,643	38,46	35,33	1,089
CF-76x1,2	54,29	269,76	107,90	1,457	59,63	54,90	1,086
CF-76x1,8	128,58	404,64	161,86	1,159	110,28	96,68	1,141
CF-76x2	161,02	449,60	179,84	1,092	128,93	113,17	1,139
CF-76x2,25	208,33	505,80	202,32	1,018	153,52	130,49	1,177
CF-80x0,9	29,57	205,20	82,08	1,724	38,45	35,09	1,096
CF-80x1,2	53,18	273,60	109,44	1,484	59,47	66,72	0,891
CF-80x1,8	127,41	410,40	164,16	1,174	110,73	97,61	1,134
CF-80x2	159,84	456,00	182,40	1,105	129,59	109,08	1,188
CF-80x2,25	206,64	513,00	205,20	1,031	154,33	131,20	1,176
CF-94x0,9	28,59	215,28	86,11	1,802	38,70	38,09	1,016
CF-94x1,2	52,14	287,04	114,82	1,541	60,37	53,66	1,125
CF-94x1,8	123,57	430,56	172,22	1,226	112,21	94,17	1,191
CF-94x2	155,71	478,40	191,36	1,151	131,74	105,62	1,247
CF-94x2,25	200,62	538,20	215,28	1,076	156,91	127,48	1,231
CF-100x0,9	28,13	219,60	87,84	1,838	38,76	36,27	1,068
CF-100x1,2	51,39	292,80	117,12	1,570	60,55	50,67	1,195
CF-100x1,8	121,72	439,20	175,68	1,250	112,69	92,24	1,222
CF-100x2	153,06	488,00	195,20	1,175	132,25	105,70	1,251
CF-100x2,25	197,65	549,00	219,60	1,096	157,77	121,12	1,303
CF-120x0,9	26,19	234,00	93,60	1,976	38,51	35,45	1,086
CF-120x1,2	47,94	312,00	124,80	1,686	60,40	53,80	1,123
CF-120x1,8	114,38	468,00	187,20	1,337	113,38	90,84	1,248
CF-120x2	143,47	520,00	208,00	1,258	133,15	109,43	1,217
CF-120x2,25	186,47	585,00	234,00	1,171	159,65	123,29	1,295

Tabela F.2- Resultados da análise numérica. $f_y = 220\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A_{net} (mm^2)	$P_{\text{ynet}} = A_{\text{net}} f_y$ (kN)	λ_{dnet}	$P_{\text{nd-OP2}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ANSYS}}$ (kN)	$P_{\text{nd-OP2}} / P_{\text{nd-ANSYS}}$
			$f_y = 220 \text{ Mpa}$				
CF-76x0,9	29,99	202,32	44,51	1,218	28,19	24,61	1,146
CF-76x1,2	54,29	269,76	59,35	1,046	42,93	36,71	1,169
CF-76x1,8	128,58	404,64	89,02	0,832	76,40	61,27	1,247
CF-76x2	161,02	449,60	98,91	0,784	88,13	70,30	1,254
CF-76x2,25	208,33	505,80	111,28	0,731	103,07	80,61	1,279
CF-80x0,9	29,57	205,20	45,14	1,236	28,23	24,19	1,167
CF-80x1,2	53,18	273,60	60,19	1,064	42,91	40,51	1,059
CF-80x1,8	127,41	410,40	90,29	0,842	76,89	62,01	1,240
CF-80x2	159,84	456,00	100,32	0,792	88,81	70,06	1,267
CF-80x2,25	206,64	513,00	112,86	0,739	103,93	81,73	1,272
CF-94x0,9	28,59	215,28	47,36	1,287	28,52	24,95	1,143
CF-94x1,2	52,14	287,04	63,15	1,101	43,75	37,10	1,179
CF-94x1,8	123,57	430,56	94,72	0,876	78,52	61,14	1,284
CF-94x2	155,71	478,40	105,25	0,822	91,03	70,20	1,297
CF-94x2,25	200,62	538,20	118,40	0,768	106,74	79,57	1,341
CF-100x0,9	28,13	219,60	48,31	1,311	28,61	25,31	1,130
CF-100x1,2	51,39	292,80	64,42	1,120	43,97	35,65	1,233
CF-100x1,8	121,72	439,20	96,62	0,891	79,11	65,82	1,202
CF-100x2	153,06	488,00	107,36	0,838	91,74	79,53	1,153
CF-100x2,25	197,65	549,00	120,78	0,782	107,78	93,25	1,156
CF-120x0,9	26,19	234,00	51,48	1,402	28,60	25,04	1,142
CF-120x1,2	47,94	312,00	68,64	1,197	44,19	36,93	1,197
CF-120x1,8	114,38	468,00	102,96	0,949	80,46	61,13	1,316
CF-120x2	143,47	520,00	114,40	0,893	93,52	73,14	1,279
CF-120x2,25	186,47	585,00	128,70	0,831	110,56	88,27	1,253

G. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MOEN 4

Tabela G.1- Resultados da análise numérica. $f_y = 400\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A (mm ²)	$P_y = A_g f_y$ (kN)	λ_d	λ_{d1}	λ_{d2}	P_{d2} (kN)	P_{nd-OP4} (kN)	$P_{nd-ANSYS}$ (kN)	$P_{nd-OP4} / P_{nd-ANSYS}$
			$f_y = 400$ Mpa							
CF-76x0,9	29,99	216,00	86,40	1,697	0,525	0,769	77,83	39,72	35,33	1,124
CF-76x1,2	54,29	288,00	115,20	1,457	0,525	0,769	103,77	61,68	54,90	1,124
CF-76x1,8	128,58	432,00	172,80	1,159	0,525	0,769	155,65	114,42	96,68	1,184
CF-76x2	161,02	480,00	192,00	1,092	0,525	0,769	172,95	133,90	113,17	1,183
CF-76x2,25	208,33	540,00	216,00	1,018	0,525	0,769	194,57	159,66	130,49	1,224
CF-80x0,9	29,57	219,60	87,84	1,724	0,524	0,777	78,67	39,76	35,09	1,133
CF-80x1,2	53,18	292,80	117,12	1,484	0,524	0,777	104,89	61,58	66,72	0,923
CF-80x1,8	127,41	439,20	175,68	1,174	0,524	0,777	157,33	115,01	97,61	1,178
CF-80x2	159,84	488,00	195,20	1,105	0,524	0,777	174,81	134,75	109,08	1,235
CF-80x2,25	206,64	549,00	219,60	1,031	0,524	0,777	196,66	160,70	131,20	1,225
CF-94x0,9	28,59	232,20	92,88	1,802	0,520	0,802	81,58	40,16	38,09	1,054
CF-94x1,2	52,14	309,60	123,84	1,541	0,520	0,802	108,78	62,73	53,66	1,169
CF-94x1,8	123,57	464,40	185,76	1,226	0,520	0,802	163,17	116,98	94,17	1,242
CF-94x2	155,71	516,00	206,40	1,151	0,520	0,802	181,30	137,50	105,62	1,302
CF-94x2,25	200,62	580,50	232,20	1,076	0,520	0,802	203,96	163,99	127,48	1,286
CF-100x0,9	28,13	237,60	95,04	1,838	0,519	0,812	82,83	40,26	36,27	1,110
CF-100x1,2	51,39	316,80	126,72	1,570	0,519	0,812	110,44	63,01	50,67	1,244
CF-100x1,8	121,72	475,20	190,08	1,250	0,519	0,812	165,66	117,64	92,24	1,275
CF-100x2	153,06	528,00	211,20	1,175	0,519	0,812	184,06	138,22	105,70	1,308
CF-100x2,25	197,65	594,00	237,60	1,096	0,519	0,812	207,07	165,13	121,12	1,363
CF-120x0,9	26,19	255,60	102,24	1,976	0,514	0,843	86,96	40,17	35,45	1,133
CF-120x1,2	47,94	340,80	136,32	1,686	0,514	0,843	115,95	63,10	53,80	1,173
CF-120x1,8	114,38	511,20	204,48	1,337	0,514	0,843	173,92	118,84	90,84	1,308
CF-120x2	143,47	568,00	227,20	1,258	0,514	0,843	193,25	139,72	109,43	1,277
CF-120x2,25	186,47	639,00	255,60	1,171	0,514	0,843	217,41	167,77	123,29	1,361

Tabela G.2- Resultados da análise numérica. $f_y = 220\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A (mm ²)	$P_y = A_g f_y$ (kN)	λ_d	λ_{d1}	λ_{d2}	P_{d2} (kN)	$P_{\text{nd-OP4}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ANSYS}}$ (kN)	$P_{\text{nd-OP4}} / P_{\text{nd-ANSYS}}$
			$f_y = 220$ Mpa							
CF-76x0,9	29,99	216,00	47,52	1,259	0,525	0,769	42,804	29,21	24,61	1,187
CF-76x1,2	54,29	288,00	63,36	1,080	0,525	0,769	57,073	44,59	36,71	1,215
CF-76x1,8	128,58	432,00	95,04	0,860	0,525	0,769	85,609	79,79	61,27	1,302
CF-76x2	161,02	480,00	105,60	0,810	0,525	0,769	95,121	92,22	70,30	1,312
CF-76x2,25	208,33	540,00	118,80	0,755	0,525	0,769	107,011	98,07	80,61	1,217
CF-80x0,9	29,57	219,60	48,31	1,278	0,524	0,777	43,266	29,28	24,19	1,211
CF-80x1,2	53,18	292,80	64,42	1,101	0,524	0,777	57,688	44,62	40,51	1,102
CF-80x1,8	127,41	439,20	96,62	0,871	0,524	0,777	86,532	80,40	62,01	1,297
CF-80x2	159,84	488,00	107,36	0,820	0,524	0,777	96,147	93,04	70,06	1,328
CF-80x2,25	206,64	549,00	120,78	0,765	0,524	0,777	108,165	98,66	81,73	1,207
CF-94x0,9	28,59	232,20	51,08	1,337	0,520	0,802	44,871	29,70	24,95	1,190
CF-94x1,2	52,14	309,60	68,11	1,143	0,520	0,802	59,828	45,67	37,10	1,231
CF-94x1,8	123,57	464,40	102,17	0,909	0,520	0,802	89,742	82,43	61,14	1,348
CF-94x2	155,71	516,00	113,52	0,854	0,520	0,802	99,713	95,75	70,20	1,364
CF-94x2,25	200,62	580,50	127,71	0,798	0,520	0,802	112,177	100,80	79,57	1,267
CF-100x0,9	28,13	237,60	52,27	1,363	0,519	0,812	45,555	29,83	25,31	1,179
CF-100x1,2	51,39	316,80	69,70	1,165	0,519	0,812	60,740	45,96	35,65	1,289
CF-100x1,8	121,72	475,20	104,54	0,927	0,519	0,812	91,110	83,17	65,82	1,264
CF-100x2	153,06	528,00	116,16	0,871	0,519	0,812	101,234	96,63	79,53	1,215
CF-100x2,25	197,65	594,00	130,68	0,813	0,519	0,812	113,888	113,83	93,25	1,221
CF-120x0,9	26,19	255,60	56,23	1,465	0,514	0,843	47,829	29,93	25,04	1,196
CF-120x1,2	47,94	340,80	74,98	1,251	0,514	0,843	63,772	46,37	36,93	1,256
CF-120x1,8	114,38	511,20	112,46	0,992	0,514	0,843	95,658	84,92	61,13	1,389
CF-120x2	143,47	568,00	124,96	0,933	0,514	0,843	106,287	98,89	73,14	1,352
CF-120x2,25	186,47	639,00	140,58	0,868	0,514	0,843	119,573	117,22	88,27	1,328

H. RESULTADOS – SEÇÕES COM FUROS – MÉTODO ALTERNATIVO

Tabela H.1- Resultados da análise numérica. $f_y = 400\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A_{net} (mm ²)	$P_{y_{\text{net}}} = A_{\text{net}} f_y$ (kN)	λ_{dnet}	$P_{\text{nd-ALTERN.}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ANSYS}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ALTERN.}} / P_{\text{nd-ANSYS}}$
			$f_y = 400\text{ Mpa}$				
CF-76x0,9	22,90	202,32	80,93	1,880	33,49	35,33	0,948
CF-76x1,2	41,40	269,76	107,90	1,668	52,19	54,90	0,951
CF-76x1,8	98,85	404,64	161,86	1,322	98,01	96,68	1,014
CF-76x2	124,78	449,60	179,84	1,240	115,43	113,17	1,020
CF-76x2,25	161,43	505,80	202,32	1,157	138,11	130,49	1,058
CF-80x0,9	22,30	205,20	82,08	1,985	33,26	35,09	0,948
CF-80x1,2	40,97	273,60	109,44	1,691	52,28	66,72	0,784
CF-80x1,8	97,87	410,40	164,16	1,340	98,30	97,61	1,007
CF-80x2	123,59	456,00	182,40	1,257	115,83	109,08	1,062
CF-80x2,25	159,87	513,00	205,20	1,172	138,64	131,20	1,057
CF-94x0,9	21,35	215,28	86,11	2,086	33,25	38,09	0,873
CF-94x1,2	39,25	287,04	114,82	1,776	52,38	53,66	0,976
CF-94x1,8	94,54	430,56	172,22	1,402	99,21	94,17	1,053
CF-94x2	118,89	478,40	191,36	1,318	116,80	105,62	1,106
CF-94x2,25	154,63	538,20	215,28	1,225	140,33	127,48	1,101
CF-100x0,9	20,95	219,60	87,84	2,130	33,23	36,27	0,916
CF-100x1,2	38,53	292,80	117,12	1,813	52,40	50,67	1,034
CF-100x1,8	92,78	439,20	175,68	1,431	99,36	92,24	1,077
CF-100x2	116,90	488,00	195,20	1,344	117,13	105,70	1,108
CF-100x2,25	152,36	549,00	219,60	1,249	140,94	121,12	1,164
CF-120x0,9	19,44	234,00	93,60	2,294	32,90	35,45	0,928
CF-120x1,2	35,89	312,00	124,80	1,949	52,09	53,80	0,968
CF-120x1,8	86,74	468,00	187,20	1,535	99,40	90,84	1,094
CF-120x2	109,81	520,00	208,00	1,438	117,62	109,43	1,075
CF-120x2,25	142,65	585,00	234,00	1,339	141,58	123,29	1,148

Tabela H.2- Resultados da análise numérica. $f_y = 220\text{MPa}$

Seção	P_{crd} (kN)	A_{net} (mm ²)	$P_{\text{ynet}}=A_{\text{net}}f_y$ (kN)	λ_{dnet}	$P_{\text{nd-ALTERN.}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ANSYS}}$ (kN)	$P_{\text{nd-ALTERN.}} / P_{\text{nd-ANSYS}}$
			$f_y = 220\text{ Mpa}$				
CF-76x0,9	22,90	202,32	44,51	1,441	24,86	24,61	1,010
CF-76x1,2	41,40	269,76	59,35	1,237	38,18	36,71	1,040
CF-76x1,8	98,85	404,64	89,02	0,981	69,56	61,27	1,135
CF-76x2	124,78	449,60	98,91	0,920	81,03	70,30	1,153
CF-76x2,25	161,43	505,80	111,28	0,858	95,63	80,61	1,186
CF-80x0,9	22,30	205,20	45,14	1,472	24,73	24,19	1,022
CF-80x1,2	40,97	273,60	60,19	1,254	38,30	40,51	0,946
CF-80x1,8	97,87	410,40	90,29	0,994	69,90	62,01	1,127
CF-80x2	123,59	456,00	100,32	0,932	81,48	70,06	1,163
CF-80x2,25	159,87	513,00	112,86	0,869	96,23	81,73	1,177
CF-94x0,9	21,35	215,28	47,36	1,547	24,81	24,95	0,995
CF-94x1,2	39,25	287,04	63,15	1,317	38,55	37,10	1,039
CF-94x1,8	94,54	430,56	94,72	1,040	70,99	61,14	1,161
CF-94x2	118,89	478,40	105,25	0,977	82,78	70,20	1,179
CF-94x2,25	154,63	538,20	118,40	0,909	98,19	79,57	1,234
CF-100x0,9	20,95	219,60	48,31	1,580	24,83	25,31	0,981
CF-100x1,2	38,53	292,80	64,42	1,345	38,63	35,65	1,084
CF-100x1,8	92,78	439,20	96,62	1,062	71,29	65,82	1,083
CF-100x2	116,90	488,00	107,36	0,997	83,26	79,53	1,047
CF-100x2,25	152,36	549,00	120,78	0,926	98,94	93,25	1,061
CF-120x0,9	19,44	234,00	51,48	1,701	24,70	25,04	0,986
CF-120x1,2	35,89	312,00	68,64	1,445	38,63	36,93	1,046
CF-120x1,8	86,74	468,00	102,96	1,139	71,94	61,13	1,177
CF-120x2	109,81	520,00	114,40	1,067	84,40	73,14	1,154
CF-120x2,25	142,65	585,00	128,70	0,993	100,49	88,27	1,139